

ANÁLISE DA FALHA DE BLINDAGEM EM LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO SEGUNDO ABORDAGENS DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA

Aluno: André Tiso LobatoOrientador: Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira SchroederCo-Orientador: Prof. Dr. Warlley de Sousa Sales

São João del-Rei, Outubro de 2014



ANÁLISE DA FALHA DE BLINDAGEM EM LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO SEGUNDO ABORDAGENS DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA

por

André Tiso Lobato

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 a obtenção do 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-Orientador: Prof. Dr. Warlley de Sousa Sales

São João del Rei, Outubro de 2014







André Tiso Lobato

Análise da Falha de Blindagem em Linhas Aéreas de Transmissão Segundo Abordagens Determinística e Probabilística.

São João del-Rei, Outubro de 2014

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, expresso enorme gratidão ao orientador desta dissertação, Professor Marco Aurélio de Oliveira Schroeder, exemplo maior de professor e pesquisador, não apenas pelos valiosos ensinamentos técnicos, mas também pelo empenho, apoio e incentivo indispensáveis à viabilização e concretização deste trabalho.

Ao Professor coorientador Warley de Sousa Sales por suas importantes e pertinentes contribuições.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEL) da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), cujos ensinamentos serviram de base para esta pesquisa.

Aos colegas do PPGEL/UFSJ, em especial ao Rodolfo Moura e ao Ítalo Meireles pela amizade e pelas discussões e sugestões que auxiliaram no decorrer deste trabalho.

Aos alunos da UFSJ Douglas Cruz e Maicon Reis, cujo trabalho de Iniciação Científica serviu de apoio ao desenvolvimento desta pesquisa de Mestrado.

Também à Equipe da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), representada pelo Engenheiro Sandro de Castro Assis.

À Fabiana, pelo apoio incondicional e pelo suporte fundamental ao desenvolvimento e concretização desta dissertação de mestrado.

À minha família que apoiou e incentivou a realização deste trabalho, em especial à minha mãe, Flávia Tiso, exemplo de vida.

Finalmente, à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), CEMIG e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

RESUMOI						
ABSTRACT II						
LIST	A DE F	GURAS	. 111			
LIST	A DE 1	ABELAS	.vi			
1	- IN I		1			
1	.1	RELEVÂNCIA DO TEMA EM INVESTIGAÇÃO	. 1			
1	.2	CONTEXTUALIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2			
1	.3	OBJETIVOS	. 3			
	1.3.1	Objetivo geral	. 3			
	1.3.2	Objetivos específicos	. 4			
1	.4	Metodologia	. 4			
1	.5	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	. 5			
1	.6	Publicações decorrentes da dissertação	. 5			
2	– PRC	DCESSO DE CÁLCULO DA TAXA DE DESLIGAMENTOS POR FALHA DE BLINDAGEM	7			
2	.1	Considerações preliminares	7			
2	.2	DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	. 8			
	2.2.1	Fenômeno físico	. 8			
	2.2.2	P Frequência de incidência geográfica	. 8			
	2.2.3	Parâmetros da onda de corrente de descarga	10			
2	.3	INTERAÇÃO ENTRE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E LINHAS DE TRANSMISSÃO	11			
	2.3.1	Incidências direta e indireta	11			
	2.3.2	Modelo Eletrogeométrico	13			
	2.3.3	Transitórios eletromagnéticos em linhas devido à falha de blindagem	29			
	2.3.4	Avaliação da suportabilidade da cadeia de isoladores	36			
2	.4	METODOLOGIAS DE CÁLCULO DA TAXA DE DESLIGAMENTOS POR FALHA DE BLINDAGEM	39			
	2.4.1	Considerações preliminares	39			
	2.4.2	Guia IEEE Std 1243	40			
	2.4.3	IEEE Flash	43			
	2.4.4	Método de Monte Carlo	45			
2	.5	Síntese do capítulo	49			
3	– RES	ULTADOS E ANÁLISES DE SENSIBILIDADE	50			
3	.1	CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	50			

3.2	Definição do Caso Base	51
3.3	Análises paramétricas: sensibilidade da taxa de $flashover$	53
3.3.	.1 IEEE Flash	53
3.3.	.2 Flash versus Guia IEEE Std 1243	54
3.3.	.3 Ângulo de incidência	54
3.3.	.4 Modelo Eletrogeométrico	58
3.3.	.5 Altura da torre	60
3.3.	.6 Comprimento da cadeia de isoladores	63
3.3.	.7 Parâmetros de frequência de incidência geográfica e da onda de corrente da descu	arga . 65
3.3.	.8 Método de Monte Carlo	68
3.4	Síntese do capítulo	
4 – CO	ONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	
4.1	Síntese da dissertação e principais resultados	
4.2	PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	
REFERÊN	ICIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

RESUMO

As descargas atmosféricas representam a principal causa de interrupções não programadas e danos, muitas vezes permanentes, em sistemas de transmissão de energia elétrica. Neste contexto, os estudos de coordenação de isolamento associados a surtos atmosféricos desempenham um papel proeminente nos projetos de linha de transmissão. Tais estudos são divididos em duas classes principais: i) cálculo do transitório eletromagnético devido à incidência de descargas atmosféricas na estrutura das torres de transmissão ou nos cabos para-raios (no topo da torre ou ao longo do vão), fenômeno denominado backflashover, e ii) incidência direta nos cabos de fase (falha de blindagem), caso em que o eventual processo de disrupção é denominado *flashover*. Sendo o problema altamente estocástico, os métodos de determinação do desempenho de linhas podem apresentar: i) uma abordagem determinística, isto é, tratando os parâmetros aleatórios associados ao sistema de transmissão e às descargas por meio de seus valores médios ou medianos ou ii) uma abordagem probabilística, em que se tratam os parâmetros com característica aleatória mediante suas funções de densidade de probabilidade estatística, utilizando, por exemplo, o Método de Monte Carlo. Verifica-se, na literatura técnica consultada, a carência de ferramentas que possibilitem a realização de análises paramétricas sistemáticas e que permitam, adicionalmente, conduzir uma investigação quanto aos modelos eletromagnéticos adotados e suas principais simplificações. Neste contexto, esta dissertação visa realizar uma comparação entre as diversas metodologias de avaliação das taxas de desempenho de linhas de transmissão associadas ao fenômeno falha de blindagem (que, normalmente, acarreta flashover nas cadeias de isoladores). Os resultados ilustram uma significativa diferença entre as metodologias determinísticas e probabilísticas.

Palavras-chave: Falha de blindagem; *flashover*; metodologias determinísticas e probabilísticas; Método de Monte Carlo; ângulo de incidência.

ABSTRACT

Lightning represents the main cause of unscheduled outages and damages, oftentimes permanent, in electric transmission systems. Within this context, lightning surge analysis on insulation coordination studies represents a dominant aspect governing transmission lines' design. Lightning overvoltages studies are divided into main two classes: i) electromagnetic transients due to lightning being intercepted by the transmission tower or by the ground wires (at tower top or along midspan) - blackflashover and ii) direct lightning flashes on the phase conductors (shielding failure) - flashover. Being a highly stochastic problem, the methods to calculate the lightning performance of transmission lines may present: i) a deterministic approach, treating the random parameters associated with the transmission system and with lightning phenomena through their mean or median values, or ii) a probabilistic approach, treating the parameters with random characteristic by their probability density function, utilizing, for instance, the Monte Carlo Method. It is verified, within a technical literature review, a lack of computational tools that allow, overall, systematic parametric analysis and an investigation of the several approaches to the real live engineering problem. Within this context, this dissertation aims to conduct a comparison between the various methodologies available to evaluate the lightning performance of transmission lines due to shielding failure (highly probably causing insulation flashovers). The results illustrate significant differences among deterministic and probabilistic methodologies.

Key words: Shielding failure, flashover, deterministic approach, probabilistic approach, Monte Carlo Method, stroke angle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Mapa ceráunico do Brasil. (Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT	"),
2005)	9
Figura 2-2 Forma de onda de corrente registrada no Morro de Cachimbo. Adaptada o	le
(Schroeder, 2001)	1
Figura 2-3 Hipóteses de interação entre descargas atmosféricas e linhas de transmissã	0.
Adaptada de (Salari Filho, 2006)	3
Figura 2-4 Estágios de desenvolvimento dos canais descendente e ascendente no mode	lo
desenvolvido por (Wagner & Hileman, 1961). Adaptada de (Hileman, 1999)?	5
Figura 2-5 Ângulos de proteção recomendados por Young. Adaptada de (Hileman, 1999)	6
Figura 2-6 Ângulos de proteção recomendados por Young e por Brown-Whitehea	зd
comparados com os dados do projeto Pathfinder. Quadrados para corrente	es
críticas de 4 kA e cruzes para correntes críticas de 8,5 kA. Adaptada (Hilema	n,
1999)1	7
Figura 2-7 Comparação da frequência de incidência de descargas a partir do EGM com outro	วร
modelos de incidência. Adaptada de (IEEE-1993 T&D Committee, 1993)	9
Figura 2-8 Aplicação do Modelo Eletrogeométrico. Adaptada de (Martinez-Velasco & Arand	a,
2002)	20
Figura 2-9 Modelo Eletrogeométrico (detalhe). Adaptada de (Zanetta Júnior, 2003)2	21
Figura 2-10 Definição da corrente máxima (Im) (zona de falha = 0). Adaptada de (Hilema	n,
1999)	23
Figura 2-11 Determinação da corrente máxima (Im) e do ângulo de blindagem efetivo $(\alpha e$?).
Adaptada de (Hileman, 1999)2	23
Figura 2-12 Função densidade de probabilidade do ângulo de incidência para vários ajuste	эs
dos parâmetros m e k	25
Figura 2-13 Distribuição de probabilidade acumulada do ângulo de incidência com relação	а
um plano perpendicular ao solo2	26
Figura 2-14 Aplicação do Modelo Eletrogeométrico considerando a inclinação do canal o	le
descarga2	27
Figura 2-15 Propagação das ondas de corrente e de tensão ao longo do condutor	30
Figura 2-16 Representação do impulso atmosférico	30
Figura 2-17 Forma de onda rampa triangular. Adaptada de (Martinez-Velasco & Arand	a,
2002)	31
Figura 2-18 Condutor aéreo. Adaptada de (Hileman, 1999).	33
Figura 2-19 Um condutor e sua imagem sob corona. Adaptada de (Anderson, 1982)	35

Figura 2-20 Impulso atmosférico normalizado. Adaptada de (IEEE Std 1243, 1997)37
Figura 2-21 Curva de tensão-tempo para isoladores de pino. Adaptada de (IEEE Std 1243,
1997)
Figura 2-22 Curva tensão-tempo para <i>flashover</i> da cadeia de isoladores de linhas de
transmissão. Adaptada de (Anderson, 1982)
Figura 2-23 Tensão de topo de torre para um vão de 350 m e vários valores de resistência de
pé de torre (<i>Rf</i>). Adaptada de (IEEE Std 1243, 1997)42
Figura 2-24 Área de impacto47
Figura 2-25 Modelo Eletrogeométrico para determinação do ponto de impacto no Método de
Monte Carlo48
Figura 3-1 Silhueta da linha de trasmissão de 138 kV definida para o caso base52
Figura 3-2 Variação da zona de falha de blindagem média, Equação (2-36) com o valor de
pico da corrente de descarga para as Fases A, B e C
Figura 3-3 Ilustração da incidência de descargas perpendiculares para o caso de dois
condutores (1 e 2) situados a diferentes alturas (h1 e h2), com espaçamento
horizontal nulo. Adaptada de (Alvarez, 2011)56
Figura 3-4 Variação da zona de falha de blindagem com o ângulo de incidência do canal de
descarga para $I = 1, 5 kA$
Figura 3-5 Taxas de <i>flashover</i> (desligamentos/100km/ano) decorrentes de vários ajustes do
EGM, numerados de acordo com a Tabela 3-8. ($Td = 70 \ dias \ de \ trovoada/$
<i>ano</i>)60
Figura 3-6 Sensibilidade da taxa de <i>flashover</i> (<i>desligamentos</i> /100km/ano) à variação
da altura da torre para vários ajustes do EGM, numerados de acordo com a Tabela
3-8. (a) <i>Flash</i> (revisado); (b) IEEE Std 1243; (c) Ângulo de incidência. (<i>Td</i> =
70 dias de trovoada/ano)62
Figura 3-7 Sensibilidade da taxa de <i>flashover</i> (<i>desligamentos</i> /100km/ano) à variação
do comprimento da cadeia de isoladores para vários ajustes do EGM, numerados
de acordo com a Tabela 3-8. (a) <i>Flash</i> (revisado); (b) IEEE Std. 1243; (c) Ângulo
de incidência. ($Td = 70 \ dias \ de \ trovoada/ano$)
Figura 3-8 Variação das relações <i>Td x Ng</i> pelo IEEE e referentes à Minas Gerais, Brasil66
Figura 3-9 Curvas de distribuição de probabilidade cumulativa do valor de pico da corrente de
descarga67
Figura 3-10 Curvas de distribuição de probabilidade log-normal do valor de pico da corrente
de descarga67
Figura 3-11 Sensibilidade da taxa de <i>flashover</i> (<i>desligamentos/100km/ano</i>) aos

parâmetros da distribuição do valor de pico da corrente e de frequência de

incidência (IEEE x MG) para vários ajustes do Modelo Eletrogeométrico,									
numerados de acordo com a Tabela 3-8. (a) <i>Flash</i> (revisado), (b) IEEE Std 1243,									
(c) Ângulo de incidência ($Td = 70 \ dias \ de \ trovoada/ano$)									
Figura 3-12 Distribuição do valor de pico da corrente de descarga									
Figura 3-13 Distribuição dos tempos de frente de onda72									
Figura 3-14 Distribuição da posição do canal de descarga ao longo da linha73									
Figura 3-15 Distribuição do ângulo de incidência do canal de descarga73									
Figura 3-16 Distribuição do ângulo da tensão na frequência de operação74									
Figura 3-17 Representação da característica de suportabilidade do isolamento ($ u-t$) e									
sobretensão aplicada à cadeia da Fase A, considerando a onda de corrente									
modelada por uma rampa retangular ($tf = 2 \ \mu s$)									
Figura 3-18 Mudança de estado para a avaliação da suportabilidade da cadeia de isoladores									
mostrada na Figura 3-1775									

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 Expressões para o raio de atração do Modelo Eletrogeométrico. 18
Tabela 2-2 Parâmetros ${m k}$ e ${m m}$ da distribuição de probabilidade do ângulo de incidência da
descarga25
Tabela 2-3 Tipos de distribuição das variáveis aleatórias46
Tabela 3-1 Caracterização das metodologias de determinação da taxa de <i>flashover</i>
avaliadas no Capítulo 251
Tabela 3-2 Taxas de <i>flashover</i> (<i>desligamentos</i> /100km/ano) obtidas pelo <i>Flash</i> e sua
implementação, ($Td = 70 \ dias \ de \ trovoada/ano$)
Tabela 3-3 Efeito da correção da equação de determinação da corrente máxima de falha de
blindagem (<i>Im</i>)54
Tabela 3-4 Taxas de <i>flashover</i> (<i>desligamentos</i> /100km/ano) obtidas por <i>Flash</i>
(revisado) e IEEE Std 1243 ($Td = 70 \ dias \ de \ trovoada/ano$)
Tabela 3-5 Zonas de falha de blindagem segundo as Equações (2-15), (zona de falha para
descargas verticais – ZF) e (2-36), (zona de falha de blindagem média para
ângulos na faixa $\pm \pi 2$ - ZF)56
Tabela 3-6 Taxas de <i>flashover</i> (<i>desligamentos</i> /100km/ano) obtidas segundo as
diversas abordagens determinísticas descritas no Capítulo 2 (Td =
70 dias de trovoada/ano)58
Tabela 3-7 Taxas de <i>flashover</i> (<i>desligamentos</i> /100km/ano) obtidas por diferentes
ajustes dos parâmetros da distribuição de probabilidade do ângulo de inclinação
do canal de descarga, ($Td = 70 \ dias \ de \ trovoada/ano$)
Tabela 3-8 Ajustes do Modelo Eletrogeométrico apresentados no Capítulo 2 empregados nas
análises paramétricas e de sensibilidade59
Tabela 3-9 Sensibilidade da taxa de <i>flashover</i> (<i>desligamentos</i> /100km/ano) à calibração
do Modelo Eletrogeométrico (Td = 70 dias de trovoada/ano)
Tabela 3-10 Sensibilidade da taxa de <i>flashover</i> (<i>desligamentos</i> /100km/ano) à altura da
torre ($Td = 70 \ dias \ de \ trovoada/ano$)
Tabela 3-11 Sensibilidade da taxa de <i>flashover</i> (desligamentos/100km/ano) ao
comprimento da cadeia de isolador ($Td = 70 \ dias \ de \ trovoada/ano$)
Tabela 3-12 Sensibilidade da taxa de <i>flashover</i> (<i>desligamentos</i> /100km/ano) aos
parâmetros característicos da frequência de incidência e da distribuição do valor
pico da corrente da descarga atmosférica ($Td = 70 \ dias \ de \ trovoada/ano$).68

Tabela	3-13 C	ompar	ação	entre	as	taxas	de	flasho	ver	(desligamen	tos/100ki	n/ano)
	segu	undo	as	aborda	igens	s det	termi	inística	е	probabilística	(MMC)	(Td =
	70 (dias d	e tro	voada	/an	o)						71

1 – INTRODUÇÃO

1.1 Relevância do tema em investigação

A coordenação de isolamento de sistemas de transmissão de energia elétrica pode ser definida, em linhas gerais, como a seleção das suportabilidades mínimas do isolamento, consistentes com as sobretensões esperadas e de modo a obter-se um risco de falha adequado (IEEE Std 1313.1, 1996). Para tal, os métodos de coordenação de isolamento devem contemplar todas as possíveis fontes de solicitação do sistema elétrico, a saber (Hileman, 1999; Zanetta Júnior, 2003):

- a) Sobretensões atmosféricas (frentes de onda rápidas);
- b) Sobretensões de manobra (frentes de onda lentas);
- c) Sobretensões temporárias;
- d) Tensões operativas (frequência nominal).

Dentre estas, as sobretensões atmosféricas correspondem à principal causa de desligamentos não programados e danos, muitas vezes permanentes, em sistemas de transmissão de energia elétrica instalados em várias partes do mundo (IEEE Std 1243, 1997; Schroeder, 2001; Visacro, 2005). No Brasil, dada a frequência e a severidade da incidência de descargas atmosféricas, este problema é especialmente importante. Dados da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) indicam que esse número é de pelo menos cerca de 70% para linhas de transmissão até 230 kV (Alvarez, 2011). Este cenário estabelece a coordenação de isolamento associada a surtos atmosféricos como um aspecto determinante do projeto de linhas de transmissão, tendo-se em vista o atendimento aos requisitos reguladores de desempenho dos sistemas elétricos de potência, medido por meio de índices que expressam a qualidade da energia suprida (Visacro, 2005).

Um estudo das sobretensões atmosféricas visa, em última análise, obter um número representativo do desempenho do sistema elétrico frente às descargas atmosféricas, com relação à determinada dimensão do circuito e intervalo de tempo e, para tal, os métodos para quantificação deste desempenho devem contemplar os seguintes eventos (IEEE Std 1243, 1997; Soares, 2001):

 Falhas no isolamento da linha devido à incidência de uma descarga atmosférica na estrutura da torre de transmissão ou nos cabos para-raios, no topo da torre ou ao longo do vão (fenômeno denominado *backflashover*); Falhas no isolamento da linha devido à incidência de uma descarga atmosférica nos cabos fase (fenômeno denominado *flashover*).

Em qualquer destes, os seguintes três fatores principais determinam se haverá *flashover* no isolador (Cigré Working Group 33.01, 1991):

- a) A forma de onda e a polaridade do surto de tensão de descarga solicitando o isolador;
- b) A característica de suportabilidade dos isoladores, especificados, por exemplo, pelo número de discos em uma cadeia de isoladores ou pela distância de arco do condutor para a torre;
- c) A componente da tensão na frequência de operação através de isolador.

Para o levantamento dos fatores em causa são necessárias as seguintes informações relativas a (Alvarez, 2011):

- Descargas atmosféricas ⇒ taxa de incidência, onda de corrente associada à descarga e seus principais parâmetros;
- ii. Sistema de transmissão ⇒ geometria da torre de transmissão e características dos cabos fase e cabos para-raios;
- iii. Processo de interação entre as descargas atmosféricas e as linhas de transmissão.

Entretanto, a natureza estocástica do fenômeno físico em causa, insere inúmeros desafios na caracterização da resposta eletromagnética do sistema de transmissão e, consequentemente, na avaliação/quantificação do desempenho das linhas frente às descargas atmosféricas (Mariano, 2012). Diante deste panorama, diversos métodos de estimação, fundamentados na adoção de premissas simplificadoras particulares e na aplicação de modelos com diferentes graus de complexidade, têm sido apresentados na literatura técnica.

Este fato ilustra a relevância do desenvolvimento de pesquisas adicionais na temática em causa, qual seja, a investigação de métodos que permitem avaliar de forma consistente as taxas de desempenho de linhas de transmissão e que, deste modo, contribuam com o subsídio de práticas mais eficientes de proteção.

1.2 Contextualização da dissertação

Tendo-se em vista os efeitos nefastos da interação entre as descargas e os sistemas de transmissão observados em território brasileiro e dada a existência, ainda, de muitas questões em aberto em sua investigação, estudos da temática em causa despertam amplo interesse das companhias concessionárias energéticas nacionais. Nesse contexto, foi estabelecido um projeto cooperativo de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) entre a

Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e a Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)/Grupo de Alta Tensão e Coordenação de Isolamento (GATCI). O P&D, intitulado "P&D-D514: Desenvolvimento e Implantação de um Sistema Computacional para Cálculo de Desempenho de Linhas de Distribuição/Transmissão Frente às Descargas Atmosféricas com Enfoque em uma Abordagem Probabilística" é norteado pelos seguintes principais tópicos:

- a) Desenvolvimento de um ambiente computacional, elaborado em ambiente de programação paralelo-distribuída, para o cálculo de desempenho de linhas de distribuição/transmissão frente às descargas atmosféricas por *flashover*, segundo uma abordagem probabilística.
- b) Desenvolvimento de um ambiente computacional, implementado em ambiente de programação paralelo-distribuída, para o cálculo de desempenho de linhas de distribuição/transmissão frente às descargas atmosféricas por *blackflashover*, segundo uma abordagem probabilística;
- c) Aplicação da ferramenta para calcular as distribuições estatísticas de sobretensões nas cadeias de isoladores, bem como ao longo do vão, e assim estimar o desempenho global da linha de transmissão frente às descargas atmosféricas.

Como resultado de parte das pesquisas realizadas no âmbito deste projeto em (Mariano, 2012), desenvolveu-se uma ferramenta computacional em um ambiente de acoplamento entre *MATLAB*[®] e *Alternative Transient Program* (ATP) para cálculo de transitórios eletromagnéticos e desempenho de sistemas de transmissão, segundo uma abordagem probabilística devido ao *backflashover*.

A presente dissertação de mestrado visa inteirar o ambiente computacional em desenvolvimento no âmbito do P&D-D514, em complemento aos trabalhos anteriormente realizados e se insere e contempla o tópico (a) descrito acima.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo principal desta dissertação de mestrado é implementar um pacote computacional em ambiente *MATLAB*[®] que permita avaliar o desempenho de sistemas de transmissão devido ao *flashover* segundo as abordagens determinística e probabilística pelo Método de Monte Carlo, em uma perspectiva de comparação com o software *Flash*, desenvolvido pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), e que permita,

adicionalmente, realizar de forma objetiva e prática uma série de análises de sensibilidade de interesse prático.

1.3.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo principal deste trabalho seja alcançado, os seguintes objetivos específicos devem ser obtidos:

- a) Estudo e implementação em MATLAB[®] das metodologias determinísticas e probabilísticas para cálculo do desempenho frente a descargas atmosféricas disponíveis na literatura técnica;
- b) Estudo comparativo entre as metodologias;
- c) Estudo dos principais modelos envolvidos no cálculo de transitórios eletromagnéticos em linhas devido à falha de blindagem;
- d) Estudo do Flash;
- e) Implementação do Flash em ambiente computacional MATLAB®;
- f) Estudos de sensibilidade em uma configuração típica do sistema de transmissão CEMIG para os principais parâmetros que caracterizam o desempenho.

1.4 Metodologia

Como já destacado, nesta dissertação de mestrado são comparados os métodos determinísticos e probabilísticos para o cálculo do desempenho de linhas de transmissão; para tanto devem ser explorados alguns itens específicos, que são:

- a) Estudo do estado da arte com relação às modelagens eletromagnéticas envolvidas no cálculo do transitório eletromagnético em linhas de transmissão devido à incidência de descargas atmosféricas;
- b) Estudo do estado da arte com relação às metodologias determinísticas e probabilísticas do cálculo do número de desligamentos de linhas de transmissão por falha de blindagem;
- c) Investigação das aproximações adotadas no programa Flash;
- d) Implementação do método determinístico, utilizando como base normas técnicas vigentes de proteção contra descargas atmosféricas em linhas de transmissão;
- e) Implementação do método probabilístico, fundamentado na utilização das potencialidades do Método de Monte Carlo;
- f) Validação da ferramenta desenvolvida em MATLAB[®] por meio da comparação com os resultados obtidos pelo *Flash*;

- g) Avaliações de sensibilidade paramétricas tendo-se em vista a quantificação da influência dos parâmetros da descarga atmosférica e do sistema de transmissão;
- h) Análise comparativa entre as metodologias determinística e probabilística, tendose em vista a verificação das implicações da adoção de valores medianos para a modelagem dos parâmetros aleatórios associados à descarga e ao sistema de transmissão.

1.5 Organização do texto

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

No Capítulo 2 são apresentados os principais aspectos envolvidos nos cálculos determinístico e probabilístico do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas devido ao fenômeno de *flashover*. Incialmente, os fenômenos físicos de interesse, bem como os seus parâmetros característicos, são apresentados e definidos de forma objetiva. Em seguida, são apresentadas as principais modelagens eletromagnéticas associadas aos mecanismos de interação entre as descargas atmosféricas e a resposta transitória do sistema de transmissão ao surto atmosférico.

No Capítulo 3, são apresentados os principais resultados obtidos neste trabalho, decorrentes de diversas avaliações paramétricas realizadas com o auxílio da ferramenta computacional desenvolvida.

No Capítulo 4, apresentam-se as conclusões gerais, bem como algumas propostas de continuidade.

1.6 Publicações decorrentes da dissertação

As seguintes publicações têm origem neste trabalho de dissertação de mestrado:

- Lobato, A. T; Schroeder, M. A. O; Cruz, D. E; Reis, M. R.; Moura, R. A. R; Sales, W. S.; Nascimento, L. C.; Assis, S. C., 2013. Analysis of the Cumulative Probability Distribution of the Stroke Angle in Lightning Incidence to Three-Phase Overhead Transmission Lines. Belo Horizonte, Brazil, International Symposium on Lightning Protection, XII SIPDA, pp. 128,133.
- Schroeder, M. A. O; Lobato, A. T; Cruz, D. E.; Reis, M. R.; Moura, R. A. R; Sales, W. S.; Nascimento, L. C.; Assis, S. C., 2014. *Analysis of the Cumulative Probability*

Distribution of the Stroke Angle in Lightning Incidence to Transmission Lines. Lyon, France, 2014 CIGRÉ - International Colloquium on Lightning and Power Systems .

 Lobato, A. T; Schroeder, M. A. O; Meireles, I. A. J. W.; Moura, R. A. R; Sales, W. S.; Nascimento, L. C.; Assis, S. C., 2014. *Influence of Considering a Stroke Angle Distribution on the Estimation of the Shielding Performance of Transmission Lines: Effects Of Electrogeometric Models.* Manaus, Brazil, GROUND'2014 & 6th LPE (International Conference on Grounding and Earthing & 6th International Conference on Lightning Physics and Effects).

2 – PROCESSO DE CÁLCULO DA TAXA DE DESLIGAMENTOS POR FALHA DE BLINDAGEM

2.1 Considerações preliminares

Em última análise, os estudos de coordenação de isolamento associados a surtos atmosféricos visam obter um número representativo para o desempenho do sistema elétrico frente às descargas atmosféricas com relação a determinada dimensão do circuito e intervalo de tempo. Como destacado na parte introdutória desta dissertação, o objetivo principal da mesma é apresentar avaliações, sob enfoques determinístico e probabilístico, acerca do desligamento de linhas devido à falha de blindagem. Diversas modelagens eletromagnéticas e dados de entrada estão envolvidos na referida avaliação e relacionam-se, em linhas gerais, aos seguintes aspectos do problema sob estudo (Soares, et al., 2005; Mariano, 2012):

- a) Descarga atmosférica;
- b) Mecanismo de interação entre a descarga e o sistema de transmissão;
- c) Resposta eletromagnética da linha de transmissão ao surto atmosférico;
- d) Característica de suportabilidade do isolamento.

Em consequência, o presente capítulo dedica-se à apresentação, de forma objetiva, de cada um dos itens mencionados acima aplicados ao estudo do desempenho de linhas de transmissão frente ao fenômeno de *flashover*. É merecedor de destaque que na literatura técnica especializada existem inúmeros trabalhos que abordam este fenômeno. Em decorrência, é praticamente impossível descrever todos estes trabalhos. Por conseguinte, são apresentadas, nas próximas seções, as referências que são consideradas, a juízo do autor desta dissertação, mais importantes.

É oportuno mencionar que a terminologia empregada no Brasil em relação aos termos técnicos de descargas atmosféricas e seus efeitos não é padronizada, sobretudo devido à maioria dos textos de referência ser de origem inglesa. Nesse sentido, destaca-se que a nomenclatura adotada no texto desta dissertação, corresponde àquela sugerida em (Schroeder, 2001).

2.2 Descargas atmosféricas

2.2.1 Fenômeno físico

Uma descrição detalhada do fenômeno físico integral associado à descarga atmosférica não é fundamental para o escopo deste trabalho, havendo diversas referências dedicadas a esse propósito, como por exemplo (Schroeder, 2001), (Rakov & Uman, 2003) e (Visacro, 2005). É oportuno ressaltar que, sob o aspecto prático da interação com os sistemas de transmissão, o principal interesse concentra-se nas descargas atmosféricas que possuem como fonte as nuvens cumulunimbos e que ocorrem entre nuvem e solo. Tais descargas são categorizadas pela polaridade (positiva ou negativa) da carga na região da nuvem que é efetivamente conectada ao solo e pela direção de propagação (ascendente ou descendente) do canal precursor de descarga, havendo, deste modo, quatro classes de descarga: i) descarga ascendente positiva, ii) descarga descendente positiva, iii) descarga ascendente negativa e iv) descarga descendente negativa. As descargas ascendentes (positivas ou negativas) ocorrem predominantemente a partir de estruturas muito elevadas ou instaladas no topo de regiões montanhosas. A maior parte das estruturas de linhas de transmissão atualmente em operação apresenta alturas típicas na faixa de menos de 60 a 100 metros e, deste modo, não estão geralmente sujeitas a descargas atmosféricas ascendentes. Embora descargas descendentes positivas sejam observadas em algumas regiões climáticas do mundo, a grande maioria das descargas descendentes, com percentuais estimados entre 84 e 92%, é de polaridade negativa (Cigré Working Group 33.01, 1991). No Brasil, a estimativa é de 90%, resultado similar às referências internacionais (Visacro, 2005).

Em função do exposto, esta dissertação de mestrado concentra-se nas descargas descendentes mais comuns: negativas. Detalhes do processo físico de formação, progressão em direção às estruturas terrestres, canais descendentes e ascendentes, descargas de retorno (primeiras e subsequentes), descarga piloto, raio de atração etc. podem ser encontrados, por exemplo, em (Rakov & Uman, 2003).

2.2.2 Frequência de incidência geográfica

A caracterização da região em que está localizada a linha de transmissão quanto à frequência de ocorrência de descargas atmosféricas corresponde a um aspecto primário no estudo das sobretensões atmosféricas em sistemas de transmissão. O parâmetro que traduz essa frequência é a densidade de descargas para o solo (N_g) , $(número de descargas por km^2 por ano)$. O conhecimento da densidade de descargas para a

região de interesse advém de redes de detecção e localização de descargas, de redes de contadores de descarga ou ainda da derivação indireta do nível ceráunico local (T_d), (número de dias de trovoadas por ano). Embora o último corresponda ao dado de menor qualidade (Visacro, 2005), as estatísticas mais conhecidas fazem referência ao nível ceraúnico, obtido, por exemplo, a partir das curvas isoceráunicas (ou mapas ceráunicos). A Figura 2-1 mostra o mapa brasileiro obtido da Norma NBR 5419 (Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2005). A relação entre T_d e N_g pode ser aproximada pela Equação (2-1) (Cigré Working Group 33.01, 1991):

$$N_g = kT_d^a \tag{2-1}$$

onde, $k \in a$ são constantes obtidas empiricamente.



Figura 2-1 Mapa ceráunico do Brasil. (Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2005).

2.2.3 Parâmetros da onda de corrente de descarga

Do ponto de vista de engenharia aplicada à coordenação de isolamento associada a surtos atmosféricos em linhas de transmissão, os parâmetros típicos da onda de corrente de descarga de maior interesse correspondem a (Martinez-Velasco & Aranda, 2002; Zanetta Júnior, 2003; Visacro, 2005):

- a) Forma de onda;
- b) Valor de pico (ou amplitude máxima);
- c) Tempo de frente de onda (intervalo de tempo entre o início da onda impulsiva até o primeiro pico);
- d) Tempo de meia onda (intervalo de tempo em que, após ultrapassar o valor de pico, a corrente atinge 50% deste valor).

Em função do caráter aleatório da descarga atmosférica, o conhecimento de tais parâmetros vem do estudo estatístico de medições realizadas, por exemplo, em estações de medição de descargas ou em torres instrumentadas. Análises desta natureza podem ser encontradas em (Berger, et al., 1975), (Anderson & Eriksson, 1980), (Schroeder, 2001) e outros. Destaca-se que os parâmetros apresentados em (Schroeder, 2001) são de especial interesse nesta pesquisa, sendo referentes às medições realizadas no Brasil, na Estação de Pesquisas de Descargas Atmosféricas do Morro do Cachimbo, Minas Gerais. Maiores detalhes acerca do processo de medição, da base de dados produzida, etc. podem ser encontrados em (Schroeder, 2001).

A Figura 2-2 mostra uma onda de descarga típica correspondente à primeira descarga de retorno de descargas descendentes negativas, em que são indicados os parâmetros mais representativos, (Schroeder, 2001). $T_{10/90}$ é o intervalo de tempo entre 10 (I_{10}) e 90% (I_{90}) do valor de pico da corrente e $T_{30/90}$ é o intervalo de tempo entre 30 (I_{30}) e 90% do valor de pico. Os tempos de frente correspondentes resultantes são td_{10} $\left(\frac{T_{10/90}}{0.8}\right)$ e td_{30} $\left(\frac{T_{30/90}}{0.6}\right)$. Usualmente, em aplicações práticas, o parâmetro td_{30} é mais utilizado (Zanetta Júnior, 2003).

A distribuição estatística dos parâmetros da descarga pode ser aproximada por uma distribuição log-normal, cuja função densidade de probabilidade é da forma (Hileman, 1999):

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ln}x} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(x) - \ln(\mu)}{\sigma_{ln}}\right]^2}$$
(2-2)

onde, μ é a média e σ_{ln} é o desvio padrão logarítmico.

O valor de pico da corrente é também avaliado pela função de distribuição de probabilidade acumulada (probabilidade de o valor de pico da corrente de descarga ser maior ou igual a um determinado valor de corrente I_0), que é dada pela integração da Equação (2-2)

ou, na faixa de 2 a 200 kA, aproximadamente pela Equação (2-3), (Cigré Working Group 33.01, 1991).

$$P(I > I_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_0}{I_f}\right)^{\xi}}$$
(2-3)

onde, I_f e ξ são constantes determinadas com base na distribuição correspondente em (2-2).

Após a breve descrição do fenômeno associado às descargas atmosféricas (bem como seus parâmetros geográficos e elétricos), deve-se estudar a forma de interação das descargas atmosféricas com os sistemas de transmissão.



Figura 2-2 Forma de onda de corrente registrada no Morro de Cachimbo. Adaptada de (Schroeder, 2001).

2.3 Interação entre descargas atmosféricas e linhas de transmissão

2.3.1 Incidências direta e indireta

A interação entre as descargas atmosféricas e as linhas de transmissão é analisada sob três aspectos principais, a saber (vide Figura 2-3):

1. Incidência direta no cabo fase (*a* na Figura 2-3) \Rightarrow corresponde à incidência da descarga diretamente sob os condutores fase energizados, fenômeno denominado falha de blindagem. A falha de blindagem origina um fenômeno eletromagnético transitório, traduzido em ondas viajantes de corrente e de tensão, que se propagam pelo condutor e tem grande probabilidade de exceder a tensão suportável a impulso

atmosférico (TSIA) das cadeias de isoladores, levando à formação de um arco elétrico e ao estabelecimento de um curto-circuito fase-terra (Anderson, 1982; Salari Filho, 2006; Alvarez, 2011). O mecanismo de ruptura do isolamento associado à incidência de descargas diretas nos condutores fase é denominado descarga disruptiva no isolamento ou *flashover* (Visacro, 2005). A falha de blindagem, como anteriormente descrito, corresponde ao objeto de estudo desta dissertação.

2. Incidência direta no cabo para-raios (*b* e *c* na Figura 2-3) \Rightarrow corresponde à incidência da descarga diretamente sob os cabos para-raios, caso em que usualmente se consideram os casos representativos de incidência no meio do vão (*b* na Figura 2-3) ou no topo da torre (*c* na Figura 2-3), (Salari Filho, 2006). A incidência nos cabos para-raios, embora previna o mecanismo de *flashover*, origina um fenômeno eletromagnético transitório que se propaga pelos cabos para-raios e cabos fase (devido ao acoplamento eletromagnético mútuo), e que pode eventualmente levar à falha de isolamento e ao estabelecimento de um curto-circuito fase-terra (Visacro, 2005; Salari Filho, 2006; Mariano, 2012). O mecanismo de disrupção associado à incidência de descargas nos cabos para-raios é denominado descarga disruptiva de retorno ou *backflashover* (Visacro, 2005).

3. Incidência indireta (*d* na Figura 2-3) ⇒ corresponde à incidência da descarga em regiões próximas à linha de transmissão, no solo ou em objetos próximos. Neste caso, ondas de corrente e de tensão são induzidas na linha de transmissão pelo acoplamento eletromagnético entre o campo eletromagnético produzido pela descarga e o sistema (Soares, 2001; Alvarez, 2011). Embora não seja um consenso, usualmente se considera que os níveis de sobretensões induzidas não são capazes de superar o TSIA das cadeias de isoladores e as descargas indiretas, apesar de mais frequentes, não são consideradas na avaliação de desempenho de linhas de transmissão cujas tensões são superiores a 69 kV (Fonseca, 1987; Soares, 2001; Alvarez, 2011).

Neste cenário, o desempenho dos sistemas de transmissão é usualmente dado pela soma do número de desligamentos por disrupção do isolamento devido ao *flashover* e devido ao *backflashover*. Conforme ressaltado no Capítulo 1, esta dissertação de mestrado dedicase ao estudo das sobretensões atmosféricas devido ao fenômeno de *flashover*. Para que esta avaliação seja realizada, é necessário modelar a incidência de descargas atmosféricas nos cabos fase de linhas de transmissão.





Figura 2-3 Hipóteses de interação entre descargas atmosféricas e linhas de transmissão. Adaptada de (Salari Filho, 2006).

2.3.2 Modelo Eletrogeométrico

2.3.2.1 Considerações preliminares

A avaliação das sobretensões atmosféricas em linhas de transmissão é fundamentada na aplicação de modelos de incidência, que descrevem os mecanismos da interação entre as descargas e as estruturas (tais como a linha ou a torre de transmissão), baseados em considerações do processo físico envolvido nos estágios finais de progressão do canal descendente em sua direção às mesmas e provêm uma base científica para determinação do local com maior probabilidade de incidência da descarga (Cigré Working Group 33.01, 1991; Visacro, 2005; Cooray & Becerra, 2010).

Este complexo procedimento tem sido extensivamente estudado por diversos pesquisadores há várias décadas, compreendendo desde os trabalhos pioneiros de Wagner & Hileman (Wagner & Hileman, 1961) e Golde (Golde, 1977), os estudos de (Eriksson, 1987), (Dellera & Garbagnati, 1990) e (Rizk, 1990), até investigações contemporâneas ainda em progresso, tais como a de Cooray e co-autores (Becerra & Cooray, 2006; Becerra & Cooray, 2008; Arevalo & Cooray, 2009). Ao longo deste período, um grande número de modelos analíticos e empíricos tem sido postulado e aplicado ao problema do projeto de linhas de transmissão e da estimativa de seu desempenho frente a descargas atmosféricas, coletados sob o termo "Modelo Eletrogeométrico" ou EGM

(Electrogeometric Model). O EGM (do qual o método das esferas rolantes¹ é derivado), embora simplifique a maior parte da física associada ao processo de incidência, tem sido amplamente utilizado, sendo recomendados por normas técnicas internacionais de proteção contra descargas atmosféricas de estruturas e linhas de transmissão e distribuição, tais como: (Cigré Working Group 33.01, 1991), (IEEE Std 1243, 1997), (IEEE Std 1410, 2010), (IEC 62305 1-4, 2006), além da Norma Brasileira NBR-5419 (Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2005).

Conforme ressaltado logo em (Cigré Working Group 33.01, 1991), em detrimento do sucesso na determinação de práticas de proteção com base no EGM, a utilização de métodos baseados em uma teoria melhorada do salto final de conexão da descarga atmosférica, como os modelos de progressão do líder ou LPM (*Leader Progression Model*), vem sendo discutida (Corray, et al., 2007; Mikropoulos & Tsovilis, 2008). Em comparação com o EGM, a aplicação de tais modelos é consideravelmente mais complexa (leva em conta, por exemplo, o movimento relativo dos canais de descarga ascendentes e descendentes, de diferentes pontos da estrutura) e requer, na maioria das vezes, simulação computacional. Neste contexto, ainda atualmente, estes métodos não se encontram em uso geral e o EGM continua sendo a ferramenta principal (Alvarez, 2011; Mariano, 2012), sendo o modelo adotado nesta dissertação de mestrado.

2.3.2.2 Conceito básico

O Modelo Eletrogeométrico associa os mecanismos de incidência das descargas atmosféricas com os parâmetros geométricos das linhas de transmissão mediante o conceito de raio de atração (Soares, 2001). O objetivo do modelo é determinar o ponto de impacto de uma descarga atmosférica levando-se em conta a intensidade da corrente e a localização do canal de descarga, que se supõe ter uma trajetória vertical (Martinez-Velasco & Aranda, 2002). Vários pesquisadores contribuíram para o desenvolvimento e aprimoramento da teoria eletrogeométrica, notadamente, (Wagner & Hileman, 1961), (Young, et al., 1963), (Armstrong & Whitehead, 1968), (Brown & Whitehead, 1969), (Love, 1973) e (Mousa & Srivastava, 1988), (Mousa & Srivastava, 1990).

Em (Wagner & Hileman, 1961) os autores propuseram, a partir de uma abordagem essencialmente física, um modelo simplificado para o salto final de conexão entre os canais

¹ O método das esferas rolantes ou RSM (*Rolling Sphere Method*), (Lee, 1978), tem como base os princípios básicos e a teoria do modelo eletrogeométrico (Armstrong & Whitehead, 1968) e usa uma esfera imaginária de raio r que rola acima e abaixo na superfície da estrutura para determinar os pontos vulneráveis ao atingimento por descargas atmosféricas. O raio r é determinado pela expressão do raio de atração do modelo eletrogeométrico.

precursores de descarga (mencionando, inclusive, a existência de canais ascendentes e descendentes), mostrado na Figura 2-4. Neste, o canal descendente progride em direção ao solo até que um ponto de discriminação seja alcançado e a contribuição fundamental do modelo constitui-se na indicação de meios para o cálculo da distância de salto final, posteriormente referenciada como o raio de atração, em função do potencial e da velocidade dos canais.

A velocidade da descarga de retorno (v) é estimada a partir da relação proposta por Rusck (Rusck, 1958), dada pela Equação (2-4).

$$\nu = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{500}{I}}}$$
(2-4)

em que v é a velocidade da descarga de retorno por unidade da velocidade da luz e I é a amplitude máxima da onda de corrente in kA.

A partir de v, o potencial do canal descendente (V) é calculado pela Equação (2-5) (Wagner & Hileman, 1961).

$$V = \frac{120v}{1 - 2,2v^2} \tag{2-5}$$

onde V é o potencial (MV) e v é a velocidade da descarga de retorno por unidade da velocidade da luz

Deste modo, estabelecem-se as condições para determinar a distância de salto final (ou raio de atração r) dada por (2-6). Seguindo estes passos, um valor único de r é obtido.

$$r = \frac{V}{G} \tag{2-6}$$

em que G é o valor estimado para o gradiente de disrupção (kV/m).



Figura 2-4 Estágios de desenvolvimento dos canais descendente e ascendente no modelo desenvolvido por (Wagner & Hileman, 1961). Adaptada de (Hileman, 1999).

A partir do modelo de (Wagner & Hileman, 1961), Young (Young, et al., 1963) desenvolveu expressamente o Modelo Geométrico (ou Modelo Eletrogeométrico como é mais amplamente difundido), com o objetivo único e principal de redefinir os requisitos de blindagem em função do posicionamento dos cabos para-raios e mostrar que os ângulos de proteção (α - vide Figura 2-5) deveriam ser diminuídos com o aumento da altura da estrutura da torre de transmissão. Antes desta investigação, ângulos de proteção fixos de aproximadamente 30º eram empregados com sucesso em linhas de transmissão com torres de alturas na faixa de 80 pés (24 metros) e tensão de até 230 kV. O ímpeto para os estudos de Wagner e Young foi o desempenho insatisfatório de novas linhas de circuito duplo à 345 kV, que apresentavam altura da torre de em torno de 150 pés (46 metros) e empregavam um ângulo de proteção de 33°. O resultado do estudo de Young é mostrado na Figura 2-5, em que os ângulos de proteção sugeridos são tracados em função da altura da torre. Verificase, a partir desta figura, que o modelo de Young resulta em um ângulo de proteção de aproximadamente 12º para a torre de 345 kV. Destaca-se que, a despeito da qualidade dos resultados alcançados pela metodologia, а principal contribuição de (Young, et al., 1963) constitui-se no modelo geométrico desenvolvido (Soares, 2001).





Posteriormente, em (Armstrong & Whitehead, 1968), os autores desenvolveram um modelo analítico para o estudo da blindagem efetiva de linhas de transmissão contra descargas atmosféricas e os cálculos foram comparados com os resultados do Projeto *Pathfinder* (Armstrong & Whitehead, 1964), que produziu dados mostrando falhas de blindagem em linhas instrumentadas (com tensões na faixa de 110 a 345 kV). Com base no modelo de Wagner (Wagner & Hileman, 1961), os autores apresentam a expressão simplificada para o raio de atração (r_c), dada em na Equação (2-7). Destaca-se que esta equação representa uma das mais importantes contribuições ao desenvolvimento do EGM,

posto que os autores resumem as complexas considerações físicas anteriormente realizadas em uma expressão de fácil aplicação. Armstrong & Whitehead apresentam adicionalmente uma distribuição de probabilidade para o ângulo de incidência do canal de descarga, que era assumido ser somente vertical no modelo de Young (Young, et al., 1963).

$$\bar{r}_c = c I^d \tag{2-7}$$

onde, $\bar{r}_c(m)$ é o valor médio de r_c (com probabilidade de 50% de ser excedido), I é o valor de pico da corrente de descarga (kA) e c e d são constantes calibradas por meio da comparação do modelo analítico com dados de campo de desempenho de linhas.

& Whitehead. 1969) Em (Brown 0 modelo analítico de (Armstrong & Whitehead, 1968) foi estendido para estudo de linhas de transmissão parcialmente blindadas, incluindo o efeito da distribuição do ângulo de incidência. O resultado é mostrado na Figura 2-6, onde o ângulo de proteção médio é traçado em função da altura média do cabo para-raios. Os dados atualizados do Pathfinder são também mostrados, em que cada ponto representa um ou mais *flashovers* por falha de blindagem observados. Destaca-se que Brown & Whitehead expressam o fato de os modelos terem sido calibrados utilizando a curva de distribuição de corrente proposta pelo AIEE e atentam para a necessidade de ajustes de compensação nos parâmetros obtidos.



Figura 2-6 Ângulos de proteção recomendados por Young e por Brown-Whitehead comparados com os dados do projeto *Pathfinder*. Quadrados para correntes críticas de 4 kA e cruzes para correntes críticas de 8,5 kA. Adaptada (Hileman, 1999).

Posterior aos estudos de Wagner (Wagner & Hileman, 1961), Young (Young, et al., 1963) e Whitehead e coautores (Armstrong & Whitehead, 1968; Brown & Whitehead, 1969), diversas investigações adicionais foram realizadas para estender, expandir e melhorar o EGM. A Tabela 2-1 resume algumas das principais expressões para o raio de atração segundo a Equação (2-7) apresentadas na literatura técnica. Uma revisão bibliográfica detalhada

destes e de outros trabalhos de ajuste do EGM pode ser encontrada, por exemplo, em (Soares, 2001) e (Salari Filho, 2006).

Deve-se destacar que, conforme ressaltado em (Salari Filho, 2006), a distribuição estatística de r_c é de difícil caracterização e, ao longo dos anos, os autores passaram a referenciar um único valor de r_c . Ademais, verifica-se que, usualmente, os autores propõem um raio de atração para os cabos fase e para-raios (r_c) e um raio de atração para o solo (r_s), em geral determinado a partir da correção de r_c por um fator γ - Equação (2-8). Isto é esperado, uma vez que a característica de uma descarga em eletrodos ponta-ponta (canal descendente que conecta a um condutor no topo de uma torre) difere da característica de uma descarga em eletrodos ponta-ponta (canal descendente que conecta com o solo), (Hileman, 1999). Como em geral os gradientes de campos elétricos locais em torno dos condutores são ligeiramente mais elevados do que no nível do solo, r_c é normalmente considerado ser maior que r_a , resultando em $r_c \ge r_s$ (IEEE Std 1243, 1997).

$$r_s = \gamma r_c \tag{2-8}$$

em que r_s é raio de atração para o solo (*m*), r_c é o raio de atração para os condutores e γ é o fator de correção.

	Raio de atração			
		(r_c)	γ	
	С	d		
(Armstrong & Whitehead, 1968)	6,7	0,8	0,9	
(Brown & Whitehead, 1969)	7,1	0,75	0,9	
(Love, 1973)	10	0,65	1	
(Darveniza, et al., 1975)	9,4	0,67	1	
(Anderson, 1982)	10	0,65	0,64 para linhas UAT 0,8 para linhas EAT 1 para linhas AT	
(IEEE-1985 T&D Committee, 1985)	8	0,65	0,64 para linhas UAT 0,8 para linhas EAT 1 para linhas AT	
(IEEE-1993 T&D Committee, 1993)	10	0,65	$0,36 + 0,17\ln(43 - h^*)$ para $h \le 40 m$ 0,55 para $h > 40 m$	

Tabela 2-1 Expressões para o raio de atração do Modelo Eletrogeométrico.

* h é altura média do cabo fase, dada pela altura do condutor junto à torre menos dois terços da flecha.

Modelos de incidência como, por exemplo, os propostos Eriksson por (Eriksson, 1987), Dellera & Garbagnati (Dellera & Garbagnati, 1990) e Rizk (Rizk, 1990), pressupõem que os raios de atração não sejam, em geral, iguais para objetos que apresentam alturas diferentes, modelando o processo de conexão do canal ascendente a partir de cada elemento separadamente. A partir da calibração de expressões para o fator γ é possível fazer com que os valores dos raios de atração do EGM sejam compatíveis com aqueles obtidos por tais modelos. Em (IEEE-1993 T&D Committee, 1993), os autores derivam um modelo para γ , com base na Figura 2-7. Nesta, mostram-se curvas para vários valores de γ (β na figura) a partir do raio de atração de Love (Love, 1973), juntamente com os modelos de incidência apresentados nas referências (IEEE-1985 T&D Committee, 1985), (Eriksson, 1987), (Mousa & Srivastava, 1990) e (Rizk, 1990), para um condutor monofásico acima do solo. Todos os modelos sugerem uma tendência de diminuição de γ com o aumento da altura. Para uma altura média do condutor h na faixa de 0 a 40 m, um ajuste razoável com os valores computados com o modelo de Rizk é obtido para γ dado pela Equação (2-9), (IEEE-1993 T&D Committee, 1993).



$$\gamma = 0.36 + 0.168 \ln(43 - h) \tag{2-9}$$



Figura 2-7 Comparação da frequência de incidência de descargas a partir do EGM com outros modelos de incidência. Adaptada de (IEEE-1993 T&D Committee, 1993).

A Figura 2-8 apresenta a aplicação do EGM para determinação do ponto de impacto de uma descarga, sendo constituída por meio dos seguintes passos (Martinez-Velasco & Aranda, 2002; Zanetta Júnior, 2003):

- 1. Calculam-se as distâncias r_s e r_c para uma corrente *I* específica, a partir da Equação (2-7);
- Traça-se uma linha paralela ao solo a uma distância r_s acima do solo, dada pela Equação (2-8);
- Traçam-se arcos de raio r_c centrados nos condutores fase e para-raios até que cortem a linha paralela traçada no passo anterior.

A partir da Figura 2-8, estabelece-se que qualquer canal descendente, cuja trajetória é assumida ser vertical, que incida sob o arco entre A e B atingirá o cabo fase, a despeito do cabo para-raios ou do solo. A projeção do arco AB na superfície do solo define a zona de falha de blindagem, ou simplesmente, "zona de falha" $(Z_f)^2$. Além do ponto B a descarga termina na "zona do solo". Finalmente, a descarga atingirá o cabo para-raios se o canal descendente estiver sob o arco AO, cuja projeção no solo define a "zona protegida" (Z_p) . Para cada valor de corrente *I* tem-se uma zona desprotegida, que corresponde ao arco AB ou à distância horizontal Z_f .





Da Figura 2-8 e da Figura 2-9 definem-se *b* e *L* conforme Equação (2-10).

² A zona de falha de blindagem é também referida na literatura técnica consultada como distância horizontal de exposição e/ou distância horizontal (ou largura) de falha de blindagem.

$$L = a_2 - a_1$$

(2-10)
$$b = y_1 - y_2$$

Sendo as alturas $y_1 e y_2$ na Figura 2-8 e na Equação (2-10), as alturas médias do cabo para-raios e do cabo fase, respectivamente, dadas pela Equação (2-11).

$$y_i = h_t - \frac{2}{3}(h_t - h_{m\nu})$$
(2-11)

em que h_t é a altura do cabo junto à torre e h_{mv} sua altura no meio vão. A distância $h_t - h_{mv}$ é a flecha do cabo do condutor.

O ângulo entre os raios r_c , definido como 2β é dado pela Equação (2-12).

$$\beta = sen^{-1} \frac{c}{2r_c} = sen^{-1} \frac{\sqrt{L^2 + b^2}}{2r_c} = sen^{-1} \frac{b\sqrt{1 + tg^2\alpha}}{2r_c}$$
(2-12)

Os ângulos α e θ são descritos na Equação (2-13). O ângulo α é denominado ângulo de proteção ou de blindagem, sendo usualmente utilizado para a definição do posição dos cabos para-raios ao redor dos condutores fase. O ângulo de proteção é negativo se os cabos para-raios estiverem dispostos horizontalmente externos aos cabos fase.

$$\alpha = tg^{-1}\frac{L}{b} \qquad \theta = sen^{-1}\frac{r_s - y_2}{r_c}$$
(2-13)

A partir destes parâmetros, se obtêm as zonas protegida (Z_p) e de falha (Z_f) para cada corrente *I*, de acordo com as Equações (2-14) e (2-15).

$$m = r_c \cos\theta$$

$$n = r_c \cos(\alpha + \beta)$$

$$Z_n(I) = r_c \cos(\alpha - \beta)$$
(2-14)

$$Z_f(I) = m - n = r_c[\cos\theta - \cos(\alpha + \beta)]$$
(2-15)

Para r_s menor ou igual a y_2 (altura do condutor fase), faz-se θ igual a zero em (2-13).



Figura 2-9 Modelo Eletrogeométrico (detalhe). Adaptada de (Zanetta Júnior, 2003).

A Figura 2-10 mostra o diagrama da Figura 2-8 repetido para vários valores de corrente de descarga *I*. Verifica-se a partir desta que na medida em que *I* aumenta os raios de atração r_c e r_s também aumentam e, para ângulos de proteção normais, a zona de falha de blindagem diminui. Um ponto é atingido a uma corrente máxima (I_m) em que os raios de atração coincidem e a partir do qual Z_f se torna zero, isto é, nenhuma descarga incide sob o condutor fase.

A Figura 2-11 reproduz a situação em que I_m é definida. Desta, o valor do raio de atração para o solo em I_m (r_{sm}) pode ser encontrado a partir das Equações (2-16) a (2-19), (Hileman, 1999).

$$r_{sm} = \frac{h+y}{2k_0} \left[1 + \sqrt{1 - k_0 \left[1 + \left(\frac{a}{h+y}\right)^2 \right]} \right]$$
(2-16)

em que:

$$a = \sqrt{r_c^2 - (r_s - h)^2} - \sqrt{r_c^2 - (r_s - y)^2}$$
$$k_0 = 1 - \gamma^2 sen^2 \alpha \qquad \gamma = \frac{r_c}{r_s}$$

Também da Figura 2-11, deduz-se a Equação (2-17).

$$sen\alpha = \frac{r_{sm} - \frac{h+y}{2}}{\sqrt{r_{cm}^2 - \frac{c^2}{4}}}$$
(2-17)

Usualmente, tem-se na Equação (2-17) que:

$$r_{sm}^2 \gg \frac{c^2}{4} \tag{2-18}$$

Assim, como uma aproximação razoável, de (2-17) e (2-18), tem-se:

$$r_{sm} = \frac{(h+y)/2}{1-\gamma sen\alpha}$$
(2-19)

Em (Anderson, 1982), apresenta-se a Equação (2-20) como alternativa para a determinação de r_{sm} .

$$r_{sm} = \frac{h+y}{2} \left[\frac{-\gamma (m^2+1)\sqrt{[\gamma (m^2+1)]^2 - k_s (m^2+1)}}{k_s} \right]$$
(2-20)

em que:

$$m = \frac{a}{h - y} \qquad \qquad k_s = m^2 - \gamma m^2 - \gamma^2$$

Finalmente, r_{sm} e I_m podem ser relacionados invertendo a Equação (2-7), obtendo-se a Equação (2-21).



Figura 2-10 Definição da corrente máxima (I_m) (zona de falha = 0). Adaptada de (Hileman, 1999).



Figura 2-11 Determinação da corrente máxima (I_m) e do ângulo de blindagem efetivo (α_e). Adaptada de (Hileman, 1999).

(2-21)
Com base na Figura 2-11, pode-se adicionalmente derivar uma expressão que traduza um ângulo de blindagem (α) efetivo. Para tal, considera-se fixa a posição do cabo fase e move-se o cabo para-raios horizontalmente até que a zona de falha (Z_f) seja reduzida a zero. Tomando a coordenada horizontal x do cabo fase como referência, a coordenada x_e do cabo para-raios para blindagem efetiva (x_e) e o ângulo efetivo (α_e) podem ser determinados pela Equação (2-22).

$$x_{e} = \sqrt{r_{c}^{2} - (r_{s} - h)^{2}} - \sqrt{r_{c}^{2} - (r_{s} - y)^{2}}$$

$$\alpha_{e} = tg^{-1} \frac{x_{e}}{h - y}$$
(2-22)

2.3.2.3 Ângulo de incidência

Na concepção original do EGM (Young, et al., 1963) somente descargas verticais eram consideradas, isto é, admite-se que o canal descendente progride a uma direção perpendicular à linha de transmissão. Entretanto, a incidência de descargas atmosféricas se realiza invariavelmente com alguma inclinação em relação à vertical que, como todos os demais parâmetros associados às descargas, apresenta uma natureza estatística (Fonseca, 1987). Como descrito no item anterior, em (Armstrong & Whitehead, 1968) os autores desenvolveram o conceito de que os sucessivos canais poderiam aproximar-se da linha com ângulos quaisquer diferentes de 0° em relação a um eixo vertical perpendicular à linha e sugeriram uma correlação trigonométrica para a distribuição de probabilidade do ângulo antes do salto final, dada pela Equação (2-23).

$$p(\phi) = k \cos^m \phi \tag{2-23}$$

onde, ϕ é o desvio em relação à direção vertical na faixa $\pm \frac{\pi}{2}$ e o coeficiente *m* é calibrado experimentalmente. O parâmetro *k* é determinado a partir da integração de $p(\phi)$, que deve ser igual à unidade, conforme Equação (2-24).

$$k = \frac{1}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^{m}\phi d\phi}$$
(2-24)

Diferentes classes de valores de m e k são mostrados na Tabela 2-2. As curvas de distribuição de probabilidade correspondentes encontram-se representadas na Figura 2-12. A partir desta, verifica-se que o ajuste m = 0 refere-se a uma distribuição de probabilidade uniforme, enquanto que para $m \ge 2$ as curvas tendem à distribuição normal. Ademais, $m = \infty$ corresponde à incidência na direção vertical ($\phi = 0$), em que $p(\phi)$ degenera para função delta de Dirac.





Figura 2-12 Função densidade de probabilidade do ângulo de incidência para vários ajustes dos parâmetros m e k.

Posteriormente, (Brown & Whitehead, 1969) atestaram que o melhor ajuste com os estudos de desempenho de linhas de transmissão parcialmente blindadas do *Pathfinder* era obtido com os valores m = 2 e $k = 2/\pi$, que conduzem à função densidade de probabilidade $p(\phi)$ dada na Equação (2-25).

$$p(\phi) = \left(\frac{2}{\pi}\right)\cos^2\phi \tag{2-25}$$

A partir de (2-25), a formulação para a distribuição de probabilidade acumulada $P(\phi > \phi_0)$ pode ser calculada mediante a Equação (2-26), cujo resultado gráfico é mostrado na Figura 2-13. Como pode ser observado, verifica-se uma grande tendência à incidência de

descargas com direção de 0° (em relação a um plano fixo perpendicular à linha). Entretanto, ângulos superiores a 30° ocorrem em 40% das descargas, enquanto que em torno de 18% dos casos, um ângulo de 45° é excedido. Ademais, embora haja uma probabilidade relativamente baixa de ocorrência de um ângulo de incidência superior a 60°, é fácil demostrar que a suposição de incidência somente na direção vertical pode ser uma aproximação limitada (Lobato, et al., 2013).

$$P(\phi > \phi_0) = \left(\frac{4}{\pi}\right) \int_{\phi_0}^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \phi \, d\phi$$
 (2-26)



Figura 2-13 Distribuição de probabilidade acumulada do ângulo de incidência com relação a um plano perpendicular ao solo.

Desde a proposição da distribuição de probabilidade para o ângulo de incidência em (Armstrong & Whitehead, 1968), não são muitos os trabalhos que têm sido publicados em que esta é considerada no estudo do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, podendo-se citar, por exemplo, (Darveniza, et al., 1975), (Darveniza, et al., 1979) e, mais recentemente, (Salari Filho, 2006), (Martinez & Castro-Aranda, 2006), (Shafaei, et al., 2011) e Lobato & outros (Lobato, et al., 2013; Schroeder, et al., 2014; Lobato, et al., 2014). Na maior parte dos trabalhos em que se desconsidera o ângulo do canal de descarga, justifica-se o emprego de somente descargas verticais tanto por questões associadas ao mecanismo de progressão da descarga, quanto por incertezas relacionadas 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 existência de objetos ou árvores nas proximidades da linha (Anderson, 1982; Salari Filho, 2006). Como destaca (Fonseca, 1987), a suposição de que a incidência é somente na direção vertical introduz erros na avaliação do desempenho de linhas de transmissão, principalmente no estudo da falha de blindagem, uma vez que a área de exposição dos condutores fica reduzida, fazendo com que a possibilidade de que um cabo condutor seja atingido fique menor. Resultados preliminares desta dissertação de mestrado indicam um aumento de 10 a 30 % nos resultados de falha de blindagem (e, consequentemente, nas taxas de desligamento por *flashover*) quando comparados com a consideração de somente descargas verticais, (Lobato, et al., 2013), (Schroeder, et al., 2014), (Lobato, et al., 2014).

A aplicação do EGM para uma determinada corrente *I* e ângulo ϕ é apresentada na Figura 2-14.





Da Figura 2-14, define-se *b* de acordo com a Equação (2-27):

$$b = a_2 - a_1 \tag{2-27}$$

As distâncias horizontais x_1 e x_2 são determinadas conforme Equação (2-28).

$$x_1 = b + r_c \cos\theta$$

$$x_2 = b + r_c \cos(\alpha + \beta)$$
(2-28)

Adicionalmente, as alturas $h_1 e h_2$ podem ser calculadas como se descreve em (2-29).

$$h_1 = y_2 + r_c sen(\alpha + \beta)$$

$$h_2 = r_s$$
(2-29)

A partir destas, obtém-se a zona de falha de blindagem (Z_f) para cada corrente I e ângulo ϕ (na faixa $-\pi/2$ a $\pi/2$) mediante as Equações (2-30) e (2-31).

$$m = x_2 + h_2 t g \phi \tag{2-30}$$

$$n = x_1 + h_1 t g \phi$$

$$Z_f(l,\phi) = m - n = (x_2 - x_1) + (h_2 - h_1)tg\phi$$
(2-31)

Substituindo (2-28) e (2-29) em (2-31) tem-se que:

$$Z_f(I,\phi) = r_c[\cos\theta - \cos(\alpha + \beta)] + [r_s - y_2 - r_c sen(\alpha + \beta)]tg\phi$$
(2-32)

Para $r_s < y_2$, as distâncias $x_2 \in h_2$ são calculadas conforme Equação (2-33).

$$x_2 = b + r_c cos\phi$$

$$h_2 = y_2 + r_c sen\phi$$
(2-33)

Deste modo, a zona de falha é dada pela Equação (2-34).

$$Z_f(I,\phi) = r_c[\cos\phi - \cos(\alpha + \beta)] + \{(y_2 + r_c sen\phi) - [y_2 - r_c sen(\alpha + \beta)]\}tg\phi$$
(2-34)
ou,

$$Z_f(I,\phi) = r_c[\cos\phi - \cos(\alpha + \beta)] + r_c[sen\phi - sen(\alpha + \beta)]tg\phi$$
(2-35)

Destaca-se que os ângulos α , $\beta \in \theta$ de (2-28) a (2-35) são aqueles descritos na Figura 2-9 e Equações (2-12) e (2-13).

Em termos probabilísticos e considerando toda a gama de valores de ϕ , a zona de falha de blindagem é dada pela Equação (2-36).

$$\bar{Z}_{f}(I) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} Z_{f}(I,\phi) p(\phi) d\phi$$
(2-36)

Com a caracterização do modelo que quantifica a interação entre descargas atmosféricas e linhas de transmissão, a sequência natural é estabelecer métodos de cálculo do transitório eletromagnético decorrente da injeção de corrente (representativa da descarga atmosférica) na linha. Isto permitirá a determinação da sobretensão atmosférica, por exemplo, na cadeia de isoladores.

2.3.3 Transitórios eletromagnéticos em linhas devido à falha de blindagem

2.3.3.1 Considerações Preliminares

O cálculo do transitório eletromagnético em uma linha de transmissão devido à incidência de descargas atmosféricas visa determinar as solicitações resultantes nos isolamentos da linha, bem como a probabilidade de disrupção nas cadeias de isoladores³. O termo "surto" denota um estado de sobretensão elétrica que dura menos de alguns milissegundos.

Quando a descarga atmosférica atinge uma linha de transmissão, provoca o aparecimento de ondas viajantes pelo sistema, com reflexões e refrações nos pontos onde há mudanças da impedância característica. Para determinar os surtos de tensão e de corrente resultantes em várias partes do sistema, é necessária uma análise de ondas viajantes (Fonseca, 1987). As sobretensões atmosféricas têm natureza impulsiva e de curta duração, com frentes de onda relativamente rápidas, da ordem de alguns μs , e tempos de decaimento da ordem de $100 \,\mu s$ a $300 \,\mu s$ e contêm altas frequências, da ordem de centenas de kHz (Zanetta Júnior, 2003).

Quando a descarga incide em um condutor fase, a corrente de retorno se divide em duas parcelas de amplitudes aproximadamente iguais $\left(\frac{l_p}{2}\right)$, como mostra a Figura 2-15. Uma onda de corrente i se propaga para cada lado da linha a partir do ponto de impacto, cuja amplitude máxima é metade da corrente incidente (Fonseca, 1987; Visacro, 2005). Associada cada onda de corrente há uma onda а que se propaga, de tensão (ou sobretensão, dado o valor usualmente elevado de sua amplitude), v, cuja amplitude pode ser aproximada, sendo a impedância linear, pelo produto da impedância de surto do condutor (Z) pela amplitude da onda de corrente, conforme Equação (2-37).

$$v = Zi \tag{2-37}$$

As ondas de corrente e tensão se propagam ao longo do condutor. Ao atingirem o isolador que separa o condutor energizado da estrutura eletricamente conectada ao solo (torre ou poste), este fica submetido à onda resultante. Em função de seu valor elevado, a sobretensão pode ser capaz de promover a disrupção do isolamento (ou *flashover*), com estabelecimento de um arco elétrico conectando o condutor à estrutura aterrada, configurando

³ Em geral, conforme destacado em (Soares, 2001), considera-se que a probabilidade de ocorrer disrupção através do ar entre cabos para-raios e cabos fase ao longo do vão é muito pequena sendo, portanto, desconsiderada. Contudo, vale destacar que para vãos muito longos este fato é questionável, sendo necessário, portanto, considerar este tipo de fenômeno.

um curto-circuito fase-terra. Após um determinado período, o sistema de proteção deve atuar, provocando o desligamento da linha de transmissão (Visacro, 2005).



Figura 2-15 Propagação das ondas de corrente e de tensão ao longo do condutor.

2.3.3.2 Representação da onda de corrente de descarga

Em linhas gerais, a análise computacional dos transitórios eletromagnéticos originados pela incidência de descargas pode ser razoavelmente avaliada admitindo-se o canal de descarga representado por uma fonte de corrente ideal, isto é, com uma impedância interna infinita, aplicada ao ponto de impacto da descarga (Zanetta Júnior, 2003), como mostra a Figura 2-16.



Figura 2-16 Representação do impulso atmosférico.

Uma representação matemática adequada da onda de corrente da descarga descrita na subseção 2.2.3 é de fundamental importância, isto é, deve-se empregar uma aproximação razoável, em termos práticos, da forma de onda da corrente real (Salari Filho, 2006). Nesse sentido, diversos modelos para a corrente de descarga têm sido apresentados na literatura.

A. Rampas triangular e retangular

A Equação (2-38) e a Figura 2-17 descrevem a função rampa triangular, amplamente empregada na representação da primeira corrente de retorno em estudos de desempenho de linhas (Mariano, 2012). Uma particularização da onda triangular refere-se à rampa retangular, em que o tempo de t_c tende a infinito.

$$i(t) = \alpha_1 t u(t) - \alpha_2 (t - t_f) u(t - t_f)$$

$$\alpha_1 = \frac{I_{100}}{t_f}, \alpha_2 = \left(\frac{2t_c - t_f}{2t_f (t_c - t_f)}\right). I_{100}$$
(2-38)

sendo:

 $u(t), u(t - t_f)$: Função degrau unitário;



 t_f : Tempo de frente de onda de corrente de descarga (s);

 t_c : Tempo de meia onda da onda de corrente de descarga (s).



Figura 2-17 Forma de onda rampa triangular. Adaptada de (Martinez-Velasco & Aranda, 2002).

B. Outras funções

Existem outras funções utilizadas para representar a forma de onda de corrente associada a descargas atmosféricas típicas. Uma delas é a dupla exponencial, muito utilizada devido à facilidade de diferenciação e integração no tempo e, também, pela facilidade de geração pelos tradicionais geradores de impulso em laboratórios de alta tensão. Matematicamente, é dada por uma simples subtração de duas funções exponenciais multiplicadas pela função degrau.

Contudo, todas as funções citadas acima não descrevem comportamentos padrões das ondas de corrente de descargas atmosféricas, tais como: frente de onda côncava e inclinação máxima próxima ao primeiro pico de corrente. Com o objetivo de contornar tais problemas, F. Heidler idealizou uma função matemática, denominada "função de Heidler", (Conti & Visacro, 2007).

Dada a ampla utilização da rampa triangular em estudos de desempenho de linhas de transmissão, está além do escopo desta dissertação discutir e apresentar todas estas funções matemáticas. Para detalhes adicionais sugere-se consultar, por exemplo, as seguintes referências: (Salari Filho, 2006) e (Visacro, 2005).

2.3.3.3 Modelagem da linha de transmissão

A. Impedância de surto

Para estudos de transitórios eletromagnéticos subsequentes à ocorrência de falha de blindagem, a linha de transmissão pode ser representada por sua impedância de onda (Z_L), conforme Equação (2-39). Nesta expressão, R, L, C e G correspondem aos parâmetros por unidade de comprimento da linha resistência, indutância, capacitância e condutância, respectivamente, e ω representa a frequência angular ($\omega = 2\pi f$).

$$Z_L = \sqrt{\frac{(R+j\omega L)}{(G+j\omega C)}}$$
(2-39)

Quando da propagação de ondas impulsivas rápidas ou de alta frequência em linhas aéreas de transmissão, tem-se ωL muito maior que R e ωC muito maior que G na Equação (2-39) e, deste modo, a impedância de onda se aproxima da impedância de surto da linha (Z_S), dada pela Equação (2-40), (Visacro, 2005).

$$Z_S = \sqrt{\frac{L}{C}}$$
(2-40)

Admitindo o solo como um condutor elétrico perfeito (condutividade $\sigma \rightarrow \infty$), a indutância, *L*, e a capacitância, *C*, de um cabo condutor de raio *r*, localizado a uma altura *h* acima do solo (vide Figura 2-18), podem ser calculadas conforme a Equação (2-41), (Hileman, 1999), sendo *L* dada em $\mu H/m$ e *C* dada em $\mu F/m$.

$$L = 0,20 \ln \frac{2h}{r}, \quad C = 10^{-3}/18 \ln \left(\frac{2h}{r}\right)$$
 (2-41)

Substituindo a Equação (2-41) na Equação (2-40), a impedância de surto pode ser calculada de acordo com a Equação (2-42).

$$Z_S = 60 \ln\left(\frac{2h}{r}\right) \tag{2-42}$$



Figura 2-18 Condutor aéreo. Adaptada de (Hileman, 1999).

B. Efeito corona

O efeito corona é um fenômeno não linear que se origina quando a tensão excede um determinado valor crítico e o campo elétrico na região circunvizinha ao condutor supera a rigidez dielétrica do ar. Haverá uma ionização ao redor do condutor e, consequentemente, um armazenamento e movimento de cargas na região ionizada, o que pode ser caracterizado como um aumento da capacitância para o solo. Este efeito provoca uma diminuição na velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas, resultando em uma distorção no surto de tensão е uma diminuição na impedância de surto (Martinez-Velasco & Aranda, 2002). A fórmula empírica proposta por Peek, Equação (2-43), é largamente utilizada para cálculo do valor crítico do campo elétrico para início do corona (Martinez-Velasco, 2010).

$$E_c = gm\delta p \left(1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta r}} \right) \tag{2-43}$$

onde:

 $g = 30 \ kV/cm$ É a rigidez crítica do ar em campo elétrico uniforme; \dot{E} o fator de rugosidade da superfície do condutor, normalmente selecionado como 0,75; δ É a densidade relativa do ar; \dot{E} o fator de polaridade da tensão, igual a 1 para polaridade negativa e 0,5 para polaridade positiva; \dot{E} o raio do condutor (*cm*).

Na análise de transitórios em linhas de transmissão, é usual utilizar modelos do efeito corona baseados em uma descrição macroscópica do fenômeno, especialmente modelos baseados em curvas de carga-tensão (curvas q - v). Nestes, a capacitância corona é uma função somente da tensão, $C_c = f(v)$, ou uma função da tensão e suas derivadas, $C_c = f(v, \partial v/\partial t, ...)$, como mostra a Equação (2-44) (Martinez-Velasco, 2010).

$$-\frac{\partial i(x,t)}{\partial} = Gv(x,t) + C_C\left(v,\frac{dv}{dt},\dots\right)\frac{\partial v(x,t)}{\partial}$$
(2-44)

Para solucionar essa equação não linear, diversas metodologias têm sido propostas, como por exemplo, a segmentação dos vãos com a alocação de ramos de elementos não lineares ou métodos de solução baseados em diferenças finitas (Mariano, 2012). A representação do efeito corona pelo aumento do raio do condutor (McCann, 1943) é uma das primeiras propostas de modelagem da influência do efeito corona na propagação de surtos em sistemas elétricos. A aplicação do modelo consiste em determinar um ajuste para o raio equivalente do condutor antes do início da simulação. Neste caso, se considera um envelope de corona cilíndrico e simétrico, como mostra a Figura 2-19, que contém uma carga, Q, devido à tensão, V, aplicada. O campo total no ponto P é dado pela soma das contribuições do condutor e de sua imagem, de acordo com Equação (2-45).

$$E_r = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{2h-r} \right) \tag{2-45}$$

Em que,

r

Q é a carga em C/m;

é a distância em m do condutor ao ponto no espaço em que o

campo E_r (kV/m) deve ser computado;

h é a altura do condutor em m.

Integrando a Equação (2-45) de r = h até r = R, para o caso em que $h \gg R$, determinase o valor de *V* conforme Equação (2-46).

$$V = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2h}{R}$$
(2-46)

Pela Lei de Gauss, tem-se que,

$$Q = 2\pi R\epsilon E_0 \tag{2-47}$$

Substituindo a Equação (2-47) na (2-46), e solucionando para V, o raio máximo do corona pode ser determinado iterativamente conforme a Equação (2-48), (Anderson, 1982).

$$R_c \frac{2h}{R_c} = \frac{V}{E_0} \tag{2-48}$$

onde: R_c é o raio máximo do envelope de corona em $m \in V$ é a tensão aplicada em volts; E_o é o gradiente de corona limitante (V/m).

Na forma como originalmente apresentada, essa abordagem não leva em conta a variação dinâmica dos parâmetros transversais do sistema e várias outras metodologias que empregam considerações mais elaboradas estão disponíveis na literatura (Mariano, 2012). Entretanto, a Equação (2-48) figura em uma aproximação razoável e conservadora, sendo adotada na maioria das publicações técnicas, justificada mediante as incertezas envolvidas

no cálculo do desempenho (Anderson, 1982; IEEE-1985 T&D Committee, 1985; IEEE-1993 T&D Committee, 1993).



Figura 2-19 Um condutor e sua imagem sob corona. Adaptada de (Anderson, 1982).

C. Raio efetivo

Com base na modelagem desenvolvida por McCann (McCann, 1943), em (AIEE Committee Report, 1950) os autores adotaram o conceito de que o coeficiente de acoplamento efetivo de um condutor monofásico é igual à média geométrica de seus efeitos de acoplamento com e sem o envelope de corona, conforme Equação (2-49).

$$\ln\frac{2h}{R_e} = \sqrt{\ln\frac{2h}{r}\ln\frac{2h}{R_c}}$$
(2-49)

Nesta, R_e é o raio efetivo do condutor e r e R_c são, respectivamente, os raios do condutor sem e com a consideração do efeito corona. Com base na Equação (2-49), a Equação (2-50) provê uma estimativa da impedância de surto própria do condutor em função de seu raio efetivo, em alternativa à relação anteriormente apresentada na Equação (2-42).

$$Z_S = 60 \sqrt{\ln \frac{2h}{r} \ln \frac{2h}{R_c}}$$
(2-50)

Após o fornecimento dos subsídios para determinação das sobretensões atmosféricas (via cômputo do transitório eletromagnético) nas cadeias de isoladores, a sequência natural é estabelecer modelos que quantifiquem o processo de disrupção elétrica nas mesmas.

2.3.4 Avaliação da suportabilidade da cadeia de isoladores

O comportamento dos materiais isolantes de equipamentos e sistemas elétricos é função do tipo de solicitação aplicada e o processo de disrupção depende de diversos fatores, tais como, magnitude, forma de onda, duração, polaridade e tipo e estado físico do meio isolante. O desempenho dielétrico de isoladores de linhas de transmissão expostos a surtos atmosféricos é, usualmente, avaliado analiticamente ou determinado experimentalmente padronizados⁴ submetendo 0 isolamento а impulsos atmosféricos (IEEE Std 1243, 1997; Zanetta Júnior, 2003). A Figura 2-20 mostra a forma de onda de impulso normalizado dupla exponencial, com tempo de frente efetivo de 1,2 μ s, e tempo de cauda de 50 μ s (IEEE Std 1243, 1997). Se o valor de pico da tensão é suficientemente baixo, não ocorre descarga disruptiva no isolador e uma onda completa é desenvolvida, como mostra a Figura 2-20. Aumentando gradativamente a amplitude do impulso, existe um nível de tensão em que ocorre a disrupção da isolação em 50% dos testes, dominada tensão crítica de flashover ou CFO (critical flashover overvoltage). Quando ocorre a descarga disruptiva, as formas de onda resultantes são denominadas "ondas cortadas". Quando a amplitude da tensão aplicada é aumentada além da CFO, a disrupção ocorre com maior frequência e em tempos menores. Se o valor do impulso é aumentado ainda mais, as descargas disruptivas ocorrem antes que o impulso atmosférico atinja seu pico de tensão provável e as ondas resultantes são denominadas impulsos de frente íngreme.

Um impulso atmosférico com um valor que excede a CFO pode não durar um tempo suficiente para manter os feixes (*streamers*) e completar a ruptura da isolação. Um gráfico da amplitude da tensão em que ocorre disrupção da cadeia de isoladores versus o tempo para ruptura é denominado curva tensão-tempo (*v* por *t*), mostrada na Figura 2-21.

⁴ O termo "impulso" é preferencialmente utilizado quando se faz referência a ensaios, enquanto que o termo "surto" normalmente se refere a sobretensões.



Figura 2-20 Impulso atmosférico normalizado. Adaptada de (IEEE Std 1243, 1997).





Efeitos não lineares (como o efeito corona e a ionização do solo) e as reflexões em pontos de descontinuidade do sistema tendem a distorcer o surto de tensão em relação ao impulso atmosférico normalizado. Nesse contexto, modelos físicos podem ser usados para produzir curvas v por t similares à mostrada na Figura 2-20 para impulsos não normalizados e são divididos nas seguintes categorias (IEEE Std 1243, 1997):

- a) Métodos que modelam a disrupção diretamente, como o modelo de progressão do líder;
- b) Métodos derivados do modelo de progressão do líder, como os de efeito disruptivo;
- c) Métodos que usam a curva de tensão-tempo padrão durante o período anterior a forma de onda tornar-se diferente da normalizada.

Todos os métodos se encontram em uso; no entanto, nenhum é aceito universalmente (Zanetta Júnior, 2003). Nesta dissertação, o fenômeno da disrupção na cadeia de isoladores é modelado mediante terceiro método. ο adotado pelo IEEE (IEEE Std 1243, 1997). Desta forma, modelagens mais elaboradas, como método de integração e progressão do líder, não são consideradas neste trabalho. J.G. Anderson (Anderson, 1982) e o Guia IEEE Std. 1243 (IEEE Std 1243, 1997) apresentam a curva v por t proposta por Darveniza e outros (Darveniza, et al., 1975), dada pela Equação (2-51), para a análise da suportabilidade frente a impulsos normalizados (isto é, com forma 1,2/50). A Figura 2-22 ilustra um conjunto de curvas obtidas por meio da referida expressão para vários valores de comprimento do isolador (1 a 6 m).

$$V_f(t) = \left(400 + \frac{710}{t^{0.75}}\right) W \tag{2-51}$$

em que,

 V_f é a tensão de *flashover* (kV);

t é o tempo para *flashover* (μs) (0,5 $\mu s \le t \le 16 \mu s$);

W é o comprimento da cadeia de isoladores (*m*).

Neste ponto do capítulo, os principais elementos presentes na interação entre descargas atmosféricas e linhas de transmissão, na perspectiva de falha de blindagem, foram devidamente referenciados. Resta, então, descrever como tais elementos são considerados em conjunto para levantamento da taxa de desempenho associada ao mecanismo de *flashover*.



Figura 2-22 Curva tensão-tempo para *flashover* da cadeia de isoladores de linhas de transmissão. Adaptada de (Anderson, 1982).

2.4 Metodologias de cálculo da taxa de desligamentos por falha de blindagem

2.4.1 Considerações preliminares

O transitório eletromagnético subsequente à incidência direta de descargas atmosféricas nos condutores energizados de linhas de transmissão depende dos parâmetros elétricos e geométricos da linha e dos parâmetros da descarga. Sendo o problema intrinsicamente estocástico, a estimativa das taxas de desligamentos por falha de blindagem deve considerar a distribuição estatística dos seguintes parâmetros (Soares, 2001; Salari Filho, 2006; Martinez-Velasco, 2010):

- a) Valor instantâneo de tensão (à frequência de operação) no momento de ocorrência da descarga (V_I);
- b) Amplitude da onda de corrente (valor de pico I);
- c) Tempo de frente da onda de corrente (t_f) ;
- d) Ângulo de inclinação do canal de descarga (ϕ);
- e) Localização do canal de descarga ao longo do vão (P).

Em relação a tais parâmetros, a Equação (2-52) fornece uma quantificação conceitual para o desempenho por *flashover* total da linha de transmissão (D), considerando a densidade de probabilidade conjunta f.

$$D = N_{V} \int_{0}^{V_{Imax}} \int_{Imin}^{Imax} \int_{tfmin}^{tfmax} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{0}^{\tilde{vao}} \varphi f dp d\theta dt_{f} dI dV_{I}$$

$$\begin{cases} \varphi = \varphi(V_{I}, I, t_{f}, \theta, P) \\ f = f(V_{I}, I, t_{f}, \theta, P) \end{cases}$$
(2-52)

em que,

N_V Número de vãos;

- φ Número de desligamentos de um vão, para um dado conjunto de parâmetros;
- *f* Função de probabilidade conjunta.

Para proceder à solução da Equação (2-52), duas abordagens são possíveis:

 Abordagem determinística: caracteriza-se pelo caráter simplificado do cálculo e das modelagens eletromagnéticas adotadas. Aborda alguns dos parâmetros aleatórios anteriormente enumerados de modo determinístico mediante valores médios ou medianos. Esta simplificação pode não representar uma boa aproximação da natureza física do fenômeno sob estudo, o que pode comprometer a análise subsequente. O guia IEEE 1243 (IEEE Std 1243, 1997), implementado no pacote computacional *Flash*, adota uma abordagem deste gênero.

 Abordagem probabilística: de caráter mais complexo que a anterior, trata os parâmetros com característica aleatória mediante suas funções de densidade de probabilidade estatística, utilizando, por exemplo, o Método de Monte Carlo.

Nas subseções seguintes, são apresentadas as principais referências envolvidas no cálculo de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas segundo as duas abordagens anteriormente referidas.

2.4.2 Guia IEEE Std 1243

A Norma ou Guia IEEE para Melhoria do Desempenho de Linhas de Transmissão frente a Descargas Atmosféricas (IEEE Std 1243, 1997), destina-se a apresentação de equações matemáticas, tabelas e gráficos simples que fornecem a informação necessária para projetar uma linha de transmissão aérea com o mínimo de interrupções devido a descargas atmosféricas, segundo as recomendações do Grupo de Trabalho do IEEE para Estimativa do Desempenho de Linhas de Transmissão frente a Descargas Atmosféricas (IEEE-1985 T&D Committee, 1985; IEEE-1993 T&D Committee, 1993). Segundo o guia, a avaliação de desempenho frente ao fenômeno de falha de blindagem é fundamentada na aplicação da Equação (2-53).

$$N_{FFB} = 2N_g L \int_{I_c}^{I_m} Z_f(I) f_1(I) dI$$
 (2-53)

em que,

 N_{FFB}

 f_{B} é a taxa de *flashover* por falha de blindagem;

 N_g $\stackrel{\text{\'e}}{=}$ a densidade de descargas para o solo $(descargas/km^2/ano);$

L é o comprimento da linha de transmissão (m);

 $Z_f(I)$ é a zona de falha de blindagem, determinada a partir do EGM, como descrito no subitem 2.3.2.2;

 I_c é a corrente mínima ou crítica – corrente a partir da qual a sobretensão associada provocará *flashover* dos isoladores;

 I_m é a corrente máxima, descrita na subseção 2.3.2.2.

 a) A expressão recomendada para a determinação da densidade de descargas para o solo em função do nível ceráunico é aquela representada na Equação (2-54).

$$N_g = 0.04T_d^{1,25} \tag{2-54}$$

- b) L é, normalmente, tomado como sendo igual a 100 km.
- c) A largura de falha de blindagem é determinada a partir da aplicação do EGM, como descrito nas Equações (2.9) a (2.11). O ajuste do modelo recomendado é aquele sugerido em (IEEE-1993 T&D Committee, 1993):

$$r_{c} = 10I^{0.65} \qquad r_{s} = \gamma r_{c}$$

$$\gamma = \begin{cases} 0.36 + 0.17\ln(43 - y_{c}) & y_{c} \le 40 \ m \\ 0.55 & y_{c} > 40 \ m \end{cases}$$
(2-55)

onde:

 y_c é a altura média do condutor (*m*) dada pela altura na torre menos dois terços da flecha no meio do vão.

d) A corrente crítica é determinada segundo a Equação (2-56):

$$I_c = \frac{2 \times CFO}{Z_S} \tag{2-56}$$

onde:

 Z_S é a impedância de surto do condutor sob corona;

CFO é a tensão crítica de *flashover*.

 Z_s e *CFO* são determinados do seguinte modo:

i. A impedância de surto do condutor fase é determinada a partir da Equação (2-57).

$$Z_{S} = 60 \sqrt{\ln\left(\frac{2h}{r}\right) \ln\left(\frac{2h}{R_{c}}\right)}$$
(2-57)

onde:

h	é a altura média do condutor (m);
r	é o raio do condutor (m);
D	é o raio corona do condutor, determinado pela Equação (2-48)
к _С	a um gradiente de 1500 kV/m (m).

ii. A tensão crítica de *flashover* é extraída da curva tensão-tempo mostrada na Equação (2-58) e considerando o instante de tempo $t = 6 \,\mu s$, sendo este escolhido a partir de considerações referentes ao estudo do fenômeno de *backflashover*. Como exemplifica a Figura 2-23, um tempo de $6 \,\mu s$ é em geral suficiente para que a magnitude da tensão seja influenciada por reflexões de quatro ou mais torres adjacentes. A norma considera a suportabilidade do isolamento como uma variável determinística. Sempre que a amplitude máxima da corrente de descarga ultrapassa a corrente crítica, Equação (2-56), a sobretensão associada provocará disrupção. Em $t = 6 \mu s$, a Equação (2-58) pode ser reduzida para a Equação (2-59).

$$V_f(t) = \left(400 + \frac{710}{t^{0.75}}\right)W$$
(2-58)

onde,

 V_f é a tensão de *flashover* (*kV*);

é o tempo para *flashover* (μs) (para 0,5 μs – 16 μs);

W

t

é o comprimento da cadeia de isoladores
$$(m)$$
.

 $V_f(6) = CFO = 585 * W \tag{2-59}$



Figura 2-23 Tensão de topo de torre para um vão de 350 m e vários valores de resistência de pé de torre (R_f) . Adaptada de (IEEE Std 1243, 1997).

e) A densidade de probabilidade mostrada em (2-60) é recomendada para a corrente:

$$f_1(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ln}I} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(I) - \ln(\bar{I})}{\sigma_{ln}}\right]^2}$$
(2-60)

onde,

$$I < 20 \ kA$$
 $I = 61,1 \ kA$
 $\sigma_{ln} = 1,33$
 $I > 20 \ kA$
 $\bar{I} = 33,3 \ kA$
 $\sigma_{ln} = 0,61$

É oportuno destacar que ao compararem-se as Equações (2-52) e (2-53), verifica-se que as seguintes variáveis aleatórias são tratadas de forma determinística:

- a) Ângulo do canal de descarga (ϕ) \Rightarrow adota-se o valor de 0° (em relação a um eixo perpendicular à linha), isto é, somente descargas verticais são consideradas;
- b) Valor instantâneo de tensão à frequência de operação (V_I) \Rightarrow adota-se o valor de 0 V, isto é, seu efeito não é considerado;

c) Tempo de frente (t_f) \Rightarrow o tempo de frente é considerado constante e igual a 2 μs .

2.4.3 IEEE Flash

O IEEE *Flash* é um *software* de código aberto, desenvolvido para a estimativa do desempenho de linhas aéreas de transmissão e distribuição de energia elétrica frente às descargas atmosféricas, com base nas normas IEEE 1243 (IEEE Std 1243, 1997) e 1410 (IEEE Std 1410, 2010). O *Flash* (www.sourceforge.net/projects/ieeeflash/) é a ferramenta computacional para este propósito mais amplamente utilizada, tanto no âmbito acadêmico quanto por empresas do setor elétrico (Alvarez, 2011). As modelagens eletromagnéticas e métodos empregados em tal programa baseiam-se na abordagem de J. G. Anderson, que se encontra em (Anderson, 1982).

O histórico de desenvolvimento do *Flash* apresenta a seguinte cronologia:

- 1982 ⇒ versão original desenvolvida em linguagem FORTRAN;
- 1985 ⇒ primeira versão em linguagem Basic com interface com usuário em plataforma DOS;
- 2001 ⇒ primeira versão em linguagem Visual Basic for Applications (VBA), utilizando interface em Microsoft Excel[®].
- 2013 ⇒ versão 2.05 em que se adicionou a possibilidade de simulação de pararaios em paralelo com a cadeia de isoladores.

Até a versão 1.9, o *Flash* utilizava um programa separado, compilado em linguagem *C*, para executar os cálculos das taxas de desempenho a partir da entrada de dados em *Excel*[®] e suportava somente os métodos para cálculo do desempenho de linhas de transmissão. Uma análise crítica do *Flash*, incluindo um detalhamento de seu desenvolvimento e das alterações implementadas em suas sucessivas atualizações pode ser encontrada em (Alvarez, 2011).

O programa utiliza em torno de 30 passos para determinar o número de desligamentos por *flashover* e destaca-se, principalmente, o emprego da Equação (2-61) – Método de Anderson – que não requer integração numérica, como aproximação para a solução da integral do cálculo da taxa de *flashover* recomendada IEEE Std. 1243, Equação (2-53).

$$N_{FFB} = \frac{N_g}{10} \frac{Z_f(I_C)}{2} [P(I_C) - P(I_M)]$$
(2-61)

onde,

 N_{FFB} é o número de desligamentos por falha de blindagem;

 N_g é a densidade de descargas para o solo;

$Z(I_c)$	é a largura de	falha de blindad	em para a co	rrente crítica;
	0		/ /	,

- I_m é a corrente máxima de falha de blindagem;
- $P(I_c)$ é a probabilidade da corrente de descarga ser maior que I_c , Equação (2-3);
- $P(I_m)$ é a probabilidade da corrente de descarga ser maior que I_m , Equação (2-3).

Conforme se ressaltou na subseção 2.3.2, a corrente máxima (I_m), corrente limite a partir da qual não há incidência de descargas diretas nos cabos energizados, corresponde a um dos parâmetros mais importantes para a estimativa da taxa de *flashover*. De acordo com a Equação (2-21), I_m é obtida a partir do raio de atração máximo (r_{sm}), invertendo a expressão do EGM. No *Flash*, o r_{sm} é calculado a partir da Equação (2-20). Como se mostrou na Tabela 2-1, em 1985 (IEEE-1985 T&D Committee, 1985), o grupo de trabalho do IEEE indicava a Equação (2-62) para a determinação do raio de atração (r_c).

$$r_c = 8I^{0,65} \tag{2-62}$$

Em função de (2-62), a corrente máxima é calculada conforme a Equação (2-63).

$$I_m = \left(\frac{1}{8}\right)^{\frac{1}{0,65}} r_{sm}^{\frac{1}{0,65}} = 0,041 r_{sm}^{1,538}$$
(2-63)

Posteriormente, em 1993 (IEEE-1993 T&D Committee, 1993), o IEEE recomendou o uso da expressão de r_c sugerida por Love (Love, 1973), mostrada na Equação (2-64). Esta, por sua vez, conduz à determinação de I_m segundo a Equação (2-65). Este ajuste do EGM foi posteriormente reafirmado em 1997 (IEEE Std 1243, 1997) e é o atualmente adotado no *Flash*.

$$r_c = 10I^{0.65} \tag{2-64}$$

$$I_m = \left(\frac{1}{10}\right)^{\frac{1}{0.65}} r_{sm}^{\frac{1}{0.65}} = 0.029 r_{sm}^{1.538}$$
(2-65)

Contudo, verificou-se a partir de uma observação do código fonte do *Flash*, que, a despeito da modificação da expressão de determinação do raio de atração do EGM, isto é, migração da Equação (2-62) para (2-64), a Equação (2-63) permaneceu sendo adotada na derivação da corrente máxima, em detrimento da Equação (2-65). Esta questão representa, consequentemente, uma inconsistência na aplicação do Modelo Eletrogeométrico, sendo sua influência na taxa de *flashover* investigada posteriormente no Capítulo 3.

2.4.4 Método de Monte Carlo

2.4.4.1 Introdução

O Método de Monte Carlo (MMC) é um procedimento numérico iterativo que utiliza a cada novo cálculo um conjunto de valores distintos que variam de acordo com a distribuição de probabilidade associada a cada uma das variáveis aleatórias envolvidas no processo. O Método de Monte Carlo permite resolver uma grande variedade de situações físicas, uma vez que é aplicado a qualquer tipo de problema estocástico ou determinístico (Martinez-Velasco & Aranda, 2002). O erro obtido decresce segundo $1/\sqrt{N}$, sendo *N* o número de iterações realizadas (Dubi, 1999).

2.4.4.2 O Método de Box – Muller

O Método de Box-Muller é um método empregado na geração de números aleatórios com distribuição normal e parte do princípio que qualquer computador e linguagem de programação têm incorporado um sistema para gerar números aleatórios com distribuição uniforme N(0,1). A geração das variáveis aleatórias com distribuição normal e independentes (X, Y), com média zero e desvio padrão 1, pode ser realizada segundo o seguinte algoritmo (Martinez-Velasco & Aranda, 2002):

1. Gera-se

$$U \sim N(0,1)$$
 $\Theta \sim u(0,2\pi) = 2 * N(0,1)$ (2-66)

2. Calcula-se

$$R = f(U) = \sqrt{-2 * \ln(U)}$$
(2-67)

3. As variáveis aleatórias normalmente distribuídas e independentes são:

$$X = R * \cos(\Theta) \qquad \qquad Y = R * \sin(\Theta) \qquad (2-68)$$

2.4.4.3 Cálculo das variáveis aleatórias

As distribuições consideradas para as variáveis e parâmetros envolvidos no cálculo da sobretensão atmosférica são mostradas na Tabela 2-3 (Martinez-Velasco & Aranda, 2002). Os parâmetros da onda de corrente da descarga podem ser determinados pelo Método de Box – Muller.

A partir de (2-2) tem-se a Equação (2-69).

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_x x \sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{1}{2}Z^2\right)}$$
(2-69)

onde:

Capítulo 2 – Processo de cálculo da taxa de desligamentos por falha de blindagem

$$Z = \frac{\ln(x/M_x)}{\sigma_x} \tag{2-70}$$

sendo: $M_x \in \sigma_x$ o valor médio e o desvio padrão, respectivamente.

Tabela 2-3 Tipos de distribuição das variáveis aleatórias

Variável aleatória	Tipo de distribuição
Valor de pico da corrente	Log-normal
Tempo de frente	Log-normal
Localização do canal de descarga	Uniforme
Ângulo de incidência	Trigonométrica
Ângulo da tensão de regime permanente	Uniforme

Para gerar valores aleatórios, calcula-se um valor Z - X ou Y na Equação (2-68) - e, empregando a Equação (2-70), obtém-se um valor de x (amostra) que faz parte de uma distribuição determinada de acordo com a Equação (2-71).

$$x = e^{\ln M_x + Z * \sigma_x} \tag{2-71}$$

Desta forma, tem-se o valor médio e o desvio padrão de qualquer parâmetro da descarga (valor de pico da corrente, tempo de frente, tempo de cauda). Tendo-se em vista que se trata de onda de frente rápida, as seguintes restrições devem ser verificadas (Martinez-Velasco & Aranda, 2002):

- 1. Tempos de frente compreendidos entre $0,1 \ \mu s$ e $20 \ \mu s$;
- 2. Tempos de cauda inferiores a $300 \ \mu s$.

A localização do canal de descarga é obtida de acordo com uma função de probabilidade com distribuição uniforme, ao longo de uma área específica. A área em que as descargas atmosféricas estão localizadas é mostrada na Figura 2-24. A distância *d* deve ser calculada correspondendo ao valor máximo do pico de corrente de descarga, derivado da aplicação do Modelo Eletrogeométrico. O valor de corrente máximo gerado nas simulações é 200 *kA*.

A sobretensão máxima que se origina em uma linha por descargas atmosféricas depende não somente da sobretensão que a corrente de descarga origina, mas também da tensão de operação no momento em que é produzido o impacto. O valor da tensão de cada fase é calculado de forma aleatória com uma distribuição uniforme do ângulo de fase entre 0° e 360°, conforme Equação (2-72).

$$\theta = 2 * \pi * x$$

$$V_A = A_v * \cos(\theta + 0)$$

$$V_B = A_v * \cos(\theta - 2\pi/3)$$

$$V_C = A_v * \cos(\theta + 2\pi/3)$$
(2-72)

sendo:

- *x* um valor aleatório com distribuição uniforme no intervalo (0,1);
- θ o ângulo de fase em radianos;
- A_v a amplitude da fonte (V);

 V_A , V_B , V_C as tensões de cada fase.



Figura 2-24 Área de impacto.

2.4.4.4 Cálculo das taxas de desligamento

A Figura 2-25 mostra uma estrutura a ser implementada segundo uma visão geral de aplicação do Método de Monte Carlo (sorteio do ponto P e do ângulo ϕ de inclinação do canal de descarga). Os passos a serem executados por programas computacionais fundamentados em tal abordagem são (Soares, 2001):

1. Definição dos parâmetros de acordo com suas funções de densidade probabilística;

2. Aplicação do Modelo Eletrogeométrico para a definição do ponto final de conexão do canal de descarga;

3. Cálculo das sobretensões nos pontos de interesse para verificação da ocorrência de disrupção nestes pontos;

- 4. Registro dos eventos de interesse;
- 5. Verificação dos critérios de parada;
- 6. Estimativa do desempenho do sistema.

A partir do sorteio do ponto de localização do canal de descarga e do ângulo de incidência tal como descrito anteriormente, procede-se a aplicação do Modelo Eletrogeométrico, tal como é apresentado na Figura 2-25 para uma determinada corrente *I*. Para determinar o ponto de impacto, cada um dos ângulos ψ_1 a ψ_4 devem ser determinados,

proporcionais a cada corrente de descarga. A partir da Figura 2-25, as Equações (2-73) a (2-75) são obtidas (*N* é considerada como a base dos eixos horizontal e vertical). Ademais, os ângulos α , $\beta \in \theta$ são aqueles definidos nas Equações (2-12) e (2-13) e na Figura 2-9.

$$x_1 = r_c [\cos\theta - \cos(\alpha + \beta)]$$
(2-73)

$$x_2 = r_c \cos(\alpha - \beta) \tag{2-74}$$

$$S0 = y_2 + r_c \sin(\alpha + \beta) \tag{2-75}$$

Se r_c é menor ou igual a y_2 faz-se $\theta = 0$ em (2-73). Em seguida, os ângulos ψ_1 a ψ_4 são determinados, respectivamente, conforme as Equações (2-76) a (2-79).

$$\psi_1 = tg^{-1} \left(\frac{r_s}{PN + x_1 + x_2} \right)$$
(2-76)

$$\psi_2 = tg^{-1} \left(\frac{SO}{PN + x_2} \right)$$
(2-77)

$$\psi_3 = tg^{-1} \left(\frac{SO}{PN - x_2} \right)$$
(2-78)

$$\psi_4 = tg^{-1} \left(\frac{r_s}{PN - (x_1 + x_2)} \right)$$
(2-79)





Assim, em relação à Figura 2-25, a descarga atmosférica irá atingir o cabo fase ou o cabo para-raios, respectivamente, se o ângulo aleatório ψ está entre (ψ_1 , ψ_2) ou (ψ_3 , ψ_4) e entre (ψ_2 , ψ_3).

Caso ocorra uma falha de blindagem e a incidência em um cabo fase, se determina se é produzido um *flashover* nos isoladores para cada uma das descargas geradas aleatoriamente, tendo em vista a modelagem da suportabilidade da cadeia de isoladores. O valor da taxa de desligamentos é obtido da Equação (2-80).

$$N_{FFB} = \frac{N_{TC}}{N_C} * N_g * d * L$$
 (2-80)

sendo:

N _{TC}	o número de descargas que provocaram flashover;
N _C	o número de casos simulados;
Ng	a densidade de descargas para o solo (km^2/ano) ;
d	a largura da zona em estudo (<i>km</i>);
L	o comprimento da linha (<i>km</i>).

2.5 Síntese do capítulo

Neste capítulo, estão descritas todas as grandezas físicas (descargas atmosféricas e sistema de transmissão) presentes nos cálculos dos fenômenos associados à falha de blindagem e respectivas taxas de desligamento da linha. Adicionalmente, são apresentadas as principais modelagens existentes na literatura acerca das metodologias para avaliação das taxas de desligamento relativas às falhas de blindagem. Tais metodologias são, basicamente, divididas em duas vertentes: determinística (programa *Flash* do *IEEE*) e probabilística (com base no Método de Monte Carlo).

Com o exposto acima, as metodologias supracitadas são implementadas computacionalmente, objetivando a obtenção de análises de sensibilidade das taxas em questão. Tais análises são reservadas para o próximo capítulo.

3 – RESULTADOS E ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

3.1 Considerações preliminares

Conforme se ressalta ao longo deste texto, as descargas atmosféricas correspondem a um dos principais elementos solicitantes em sistemas de transmissão de energia elétrica e uma taxa aceitável⁵ de desligamentos por falha de blindagem (ou *flashovers*) representa um importante parâmetro do projeto de linhas de transmissão. Deste modo, torna-se imprescindível não apenas verificar a aplicabilidade dos métodos de avalição do desempenho destes sistemas, quanto estudar a influência dos modelos e parâmetros adotados para a caracterização das descargas atmosféricas e dos sistemas de transmissão.

O presente capítulo tem como objetivo apresentar e discutir os resultados obtidos pela aplicação da ferramenta computacional desenvolvida nesta dissertação.

Para tal, deve-se, inicialmente, definir o caso base para estudo (configuração geométrica da linha de transmissão, tensão, e características típicas das descargas atmosféricas em Minas Gerais). Este caso é utilizado para os seguintes objetivos:

- a) Validação da ferramenta computacional desenvolvida (por meio de comparações com os resultados gerados pelo *Flash*/IEEE);
- b) Análises paramétricas da sensibilidade de parâmetros físico-práticos, que contemplam:
 - i. Características da frequência de ocorrência de descargas atmosféricas: funções de ajuste do nível ceráunico ($T_d \ge N_q$);
 - Características das descargas: distribuição de probabilidade do ângulo de incidência do canal de descarga e dos parâmetros da onda de corrente (valor de pico, tempo de frente etc.)
 - iii. Características do sistema de transmissão: comprimento da cadeia de isoladores, altura da torre;
 - iv. Modelo de incidência adotado: calibração do Modelo Eletrogeométrico.
- c) Comparação entre os resultados obtidos para a taxa de *flashover* para o caso base segundo as metodologias descritas no Capítulo 2, que se encontram caracterizadas no presente capítulo do seguinte modo:

⁵ Os valores aceitáveis dependem do nível da tensão de operação da linha de transmissão, (Visacro, 2005).

- IEEE Std 1243: corresponde à implementação em MATLAB[®] do método de determinação da taxa de *flashover* que é recomendado no Guia IEEE Std. 1243, detalhada no item 2.4.2;
- ii. *Flash*: trata-se da implementação em *MATLAB*[®] do algoritmo de análise da falha de blindagem adotado no *Flash* versão 1.9, tal como se descreve no item 2.4.3;
- iii. Flash (revisado): refere-se à correção do algoritmo do Flash 1.9 quanto à aplicação consistente do ajuste do EGM recomendado por Love (Love, 1973) na determinação do parâmetro "corrente máxima", tal como se destaca no item 2.4.3;
- iv. Ângulo de incidência: corresponde à inclusão do ângulo de inclinação do canal de descarga, isto é, da contemplação tanto de descargas atmosféricas verticais quanto não-verticais na aplicação Modelo Eletrogeométrico, conforme descreve o item 2.3.2.3. A taxa de falha de blindagem é posteriormente determinada pela substituição de Z_f (zona de falha de blindagem) na equação recomendada pelo Guia IEEE Std 1243, por \bar{Z}_f , obtido mediante a Equação (2-36);
- v. Método de Monte Carlo: corresponde à implementação em MATLAB[®] de uma abordagem probabilística de avaliação da taxa de *flashover* via Método de Monte Carlo (MMC), tal como se detalha no item 2.4.4.

A Tabela 3-1 caracteriza os métodos anteriormente descritos quanto à abordagem empregada – determinística ou probabilística, a equação utilizada na determinação da taxa de *flashover* e indica, adicionalmente, quais são os parâmetros avaliados por meio de suas funções de distribuição estatística.

	Metodologia	Equação	Variáveis aleatórias
IEEE Std 1243	Determinística	(2-53)	Corrente de descarga
Flash	Determinística	(2-61)	Corrente de descarga
Flash (revisado)	Determinística	(2-61)	Corrente de descarga
Ângulo de Incidência	Determinística	(2-36)/(2-53)	Corrente de descarga e Ângulo de incidência
Método de Monte Carlo	Probabilística	(2-80)	Tempo de frente, Corrente de descarga e Ângulo de Incidência

Fabela 3-1 Caracterização das metodologias de determinação da taxa de <i>flashover</i> avaliadas no
Capítulo 2.

3.2 Definição do Caso Base

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar o desempenho frente a descargas atmosféricas quanto às falhas de blindagem de linhas de transmissão do sistema CEMIG,

localizadas em Minas Gerais, cujas tensões de operação mais frequentes encontram-se na faixa de 138 a 500 kV. A Figura 3-1 representa a silhueta das torres da linha estabelecida como base para os estudos realizados. Considera-se um sistema trifásico de 138 kV em corrente alternada (c.a.). As torres que compõem este sistema apresentam altura útil de 16 m, altura máxima de 24,47 m e base em forma de quadrado com 36 m² de área. Esta estrutura suporta três cabos fase (CAA *Linnet*) e um cabo para-raios (aço 3/8[°] HS) que é diretamente ligado às partes metálicas aterradas das torres. As cadeias de isoladores são compostas por nove isoladores padrão, com distância de arco de 1,314 m (9 × 0,146 m). Para esta configuração as flechas dos cabos condutores são, respectivamente, de 6,2 m e 6,89 m para os cabos para-raios e cabos fase.





Além das características geométricas da linha de transmissão, o cálculo do desempenho leva em conta os parâmetros de incidência geográfica, que devem ser especificados de maneira a traduzir as características da região do estado de Minas Gerais, em que os sistemas da CEMIG estão localizados. Na ferramenta computacional desenvolvida, a frequência de incidência é determinada por meio do nível ceráunico (T_d) ou, alternativamente, da densidade de descargas para o solo (N_g). Com o objetivo de permitir uma análise da relação $N_g \times T_d$, a atividade atmosférica na zona de estudo considerada é caracterizada pelo nível ceraúnico e adotou-se o valor base $T_d = 70$ (Schroeder, 2001).

3.3 Análises paramétricas: sensibilidade da taxa de flashover

3.3.1 IEEE Flash

Conforme descrito no Capítulo 2, o programa *IEEE/Flash* corresponde à implementação de modelagens eletromagnéticas recomendados pelo Grupo de Trabalho do IEEE para Estimativa do Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas, tendo-se como base a abordagem de J. G. Anderson (Anderson, 1982). A metodologia empregada no *Flash* (versão 1.9) foi implementada na ferramenta computacional desenvolvida em *MATLAB*[®] a partir da tradução de seu código originalmente construído em linguagem C. Para efeito de validação, os resultados obtidos para o cálculo da taxa de *flashover* para o caso base são mostrados na Tabela 3-2. Observa-se que há correspondência entre os dois resultados. Vale salientar que o código em C do *Flash* utiliza valores com até seis casas decimais, mas, no entanto, no máximo duas casas decimais são suficientes para a descrição, em termos práticos, das taxas de falha obtidas, sendo esse o padrão adotado na ferramenta desenvolvida.

Tabela 3-2 Taxas de flashover (desligamentos/100km/ano) obtidas pelo Flash e sua implementação, $(T_d = 70 \ dias \ de \ trovoada/ano).$

	Implementação do Flash em MATLAB®	Flash
Taxa de Flashover (Des./100 km/ano)	0,13	0,129108

Conforme se destacou em 2.4.3, verificou-se, a partir de uma observação minuciosa do código do *Flash*, que há no algoritmo uma inconsistência na aplicação do EGM. Especificamente, uma calibração do modelo diferente da adotada no restante do programa é empregada na derivação da corrente máxima de falha de blindagem. É, deste modo, oportuno proceder a correção da Equação (2-63) para a (2-65) na determinação deste parâmetro. O efeito da modificação em causa na taxa de *flashover* é apresentado na Tabela 3-3. Verifica-se que há uma redução bastante substancial (53,85%) quando se comparam os dois resultados obtidos. É oportuno salientar que, tendo-se em vista o que é anteriormente ressaltado, o segundo, referido como *Flash* revisado neste texto, traduz de modo mais realístico os resultados provenientes da metodologia proposta pelo *Flash* e será, portanto, preferencialmente utilizado como base para as análises paramétricas subsequentes. Ainda

assim, sempre que pertinente, o resultado gerado pelo algoritmo original do *Flash* será também apresentado para permitir uma comparação direta.

Tabela 3-3 Efeito da correção da equação de determinação da corrente máxima de falha de blindagem (I_m) .

	Flash	Flash (revisado)
Taxa de Flashover (Desl./100 km/ano)	0,13	0,06
Desvio (%)	-	↓ 53,85

3.3.2 Flash versus Guia IEEE Std 1243

Conforme ressaltado no Capítulo 2, o *sof tware Flash* caracteriza-se pelo emprego do método sugerido por J.G. Anderson (Anderson, 1982) para a solução da taxa de *flashover*. Tal método, caracterizado pela Equação (2-61), representa uma simplificação em relação à Equação (2-53), recomendada no Guia IEEE Std. 1243, posto que não requer a solução de uma equação integral por meio de métodos numéricos. Nesse contexto, a Tabela 3-4 apresenta uma comparação entre as taxas de *flashover* obtidas para a linha de transmissão teste mediante as Equações (2-53) e (2-61).

Pode-se verificar que, para o caso base em estudo, confirma-se o que é afirmado em (Mikropoulos & Tsovilis, 2012), isto é, a variação entre os métodos, neste caso aproximadamente 85%, pode ser significativa dependendo dos parâmetros da linha de transmissão (geometria e nível de isolamento), da distribuição do valor de pico de corrente e do modelo de incidência utilizados. Deste modo, conforme também ressaltado em (Mikropoulos & Tsovilis, 2012) e ao contrário do que é sugerido em (Anderson, 1982), o Método de Anderson não deve ser considerado como equivalente à Equação (2-53); pelo contrário, deve ser utilizado para estimativas rápidas da taxa de *flashover*.

	Flash (revisado)	IEEE Std. 1243
Taxa de Flashover (Desl./100 km/ano)	0,06	0,11
Desvio (%)	-	1 83,33%

Tabela 3-4 Taxas de flashover (desligamentos/100km/ano) obtidas por Flash (revisado) eIEEE Std 1243 ($T_d = 70$ dias de trovoada/ano).

3.3.3 Ângulo de incidência

Para avaliar-se o efeito da incorporação do ângulo de incidência na determinação das taxas de desligamento em linhas de transmissão, a Tabela 3-5 apresenta a variação das zonas de falha de blindagem em função da corrente *I* para as Equações (2-15) e (2-36), isto

Podem ser listadas as seguintes conclusões da Tabela 3-5 e da Figura 3-2:

- a) Como esperado e discutido, por exemplo, em (Fonseca, 1987) e (Salari Filho, 2006), a aproximação da incidência de descargas atmosféricas somente na direção vertical promove uma redução da zona de exposição dos cabos fase;
- b) Para amplitudes máximas da corrente de descarga superiores ou iguais a 10 kA, 6 kA e 2 kA não incidem descargas nos cabos fase A (FA), B (FB) e C (FC), respectivamente.

Tendo-se que os cabos fase A e C situam-se a diferentes alturas e espaçamento horizontal nulo, todas as descargas que eventualmente atingiriam *FC* (condutor com altura menor), atingem *FA* caso admita-se que o canal de descarga é perpendicular à linha. Em outras palavras, *FC* é blindada por *FA* e, deste modo, não sofre incidência de descargas atmosféricas diretas (a zona de falha de blindagem Z_f é nula). Tal situação, ilustrada na Figura 3-3, é bastante questionável em termos físicos e constitui uma inverdade prática (Alvarez, 2011). A Figura 3-4 mostra a variação das zonas de falha com o ângulo de incidência ϕ , Equação (2-36), para *I* = 1,5 *kA*.



Figura 3-2 Variação da zona de falha de blindagem média, Equação (2-36) com o valor de pico da corrente de descarga para as Fases A, B e C.

Ι	r _c	r_s	Z_F		r _s			$\overline{Z_F}$	
(kA)	(m)	<i>(m)</i>	А	В	С	А	В	С	
0,5	6,37	5,79	2,90	3,10	0	4,15	3,25	1,22	
1	10,00	9,08	3,11	2,90	0	4,87	4,98	1,28	
2	15,69	14,25	3,68	3,03	0	5,69	4,50	0	
3	20,42	18,55	3,93	2,62	0	5,35	3,52	0	
4	24,62	22,36	3,63	1,83	0	4,66	2,35	0	
5	28,47	25,85	3,08	0,88	0	3,83	1,11	0	
6	32,05	29,10	2,41	0	0	2,93	0	0	
7	35,43	32,17	1,66	0	0	1,99	0	0	
8	38,64	35,09	0,87	0	0	1,03	0	0	
9	41,71	37,88	0,06	0	0	0,07	0	0	
10	44,67	40,57	0	0	0	0	0	0	
12	50,29	45,67	0	0	0	0	0	0	
14	55,59	50,48	0	0	0	0	0	0	
16	60,63	55,06	0	0	0	0	0	0	
18	65,45	59,44	0	0	0	0	0	0	
20	70,09	63,65	0	0	0	0	0	0	
200	313,09	284,34	0	0	0	0	0	0	

Tabela 3-5 Zonas de falha de blindagem segundo as Equações (2-15), (zona de falha para descargas verticais – Z_F) e (2-36), (zona de falha de blindagem média para ângulos na faixa $\pm \frac{\pi}{2}$ - $\overline{Z_F}$).



Figura 3-3 Ilustração da incidência de descargas perpendiculares para o caso de dois condutores (1 e 2) situados a diferentes alturas ($h_1 e h_2$), com espaçamento horizontal nulo. Adaptada de (Alvarez, 2011).



Figura 3-4 Variação da zona de falha de blindagem com o ângulo de incidência do canal de descarga para I = 1, 5 kA.

O valor da taxa de *flashover* incorporando o ângulo de inclinação do canal de descarga na equação da norma IEEE 1243 é mostrado na Tabela 3-6. Verifica-se que há um aumento de em torno de 21% em relação ao número de desligamentos admitindo descargas somente na direção vertical, conforme sugerido pelo Grupo de Trabalho do IEEE. Tal aumento insere na faixa prevista em (Hileman, 1999), isto é, 10 a 29%. Em se (Lobato, et al., 2014), um resultado similar foi obtido para uma linha de transmissão de 230 kV, em torno de 20%. A Tabela 3-6 indica adicionalmente que, ao incluir-se nesta avaliação o resultado gerado por meio do algoritmo original do Flash, que também considera somente descargas verticais, uma interessante tendência pode ser observada: a partir da inconsistência na aplicação do EGM anteriormente descrita, impõe-se uma boa correspondência (variação de somente 7,14%) entre o método simplificado de J. G. Anderson, implementado no Flash, e aquele considerando descargas não-verticais. Esta verificação está em concordância com é destacado 0 que em (Mikropoulos & Tsovilis, 2012), qual seja, a correção observada entre resultados obtidos por meio do Flash e provenientes de dados de campo pode ser devido a erros que se anulam nas modelagens eletromagnéticas adotadas.

FlashFlash
(revisado)IEEE
Std. 1243Ângulo de
IncidênciaTaxa de Flashover
(Desl./100 km/ano)0,130,060,110,14

↓ 57,14

1,42 €

₿7,14

Tabela 3-6 Taxas de flashover (desligamentos/100km/ano) obtidas segundo as diversas abordagens
determinísticas descritas no Capítulo 2 ($T_d = 70 \ dias \ det \ trovoada/ano$).

A influência do ajuste dos parâmetros $k \in m$ da distribuição de probabilidade do ângulo de incidência, mostrados na Tabela 2-2 e na Figura 2-12, na taxa de *flashover* é apresentada na Tabela 3-7. A partir desta, é evidenciado que uma distribuição uniforme (m = 0) é aproximação rudimentar, conduzindo a uma taxa de *flashover* em torno de 220 % maior do meio do ajuste sugerido por Brown que aquela obtida por & Whitehead (Brown & Whitehead, 1969). Ainda, verifica-se que o valor m = 3, considerado razoável para as descargas atmosféricas de inverno, muito frequentes no Japão (Ouchi, et al., 1997), conduz a uma taxa 7 % menor. Adicionalmente, para m > 3, uma grande tendência ao resultado obtido para descargas na direção vertical é observado.

Tabela 3-7 Taxas de *flashover* (*desligamentos*/100*km*/*ano*) obtidas por diferentes ajustes dos parâmetros da distribuição de probabilidade do ângulo de inclinação do canal de descarga, $(T_d = 70 \ dias \ de \ trovoada/ano).$

т	Taxa de Flashover (Desl./100 km/ano)	Desvio (%)
0	0,45	221
1	0,17	1 21,43
2	0,14	-
3	0,13	↓ 7,14
4	0,12	↓ 14,29
5	0,12	↓ 14,29

3.3.4 Modelo Eletrogeométrico

Desvio (%)

Tendo-se em vista a avaliação das implicações decorrentes do ajuste do EGM empregado na estimativa da taxa de *flashover*, as taxas previstas por cada uma das calibrações do modelo apresentadas no Capítulo 2 e numeradas de acordo com a Tabela 3-8 são mostrados na Tabela 3-9 e na Figura 3-5, em comparação ao valor base obtido pelo *Flash*.

Verifica-se que, dada as diferenças expressivas nas calibrações para o raio de atração, a taxa de *flashover* difere-se de modo significativo entre os modelos. Pode-se observar que taxas relativamente menores são obtidas por modelos que preveem raios de atração maiores para os cabos condutores e para o solo (*c* e *d* na Equação (2-7)), como os modelos de Love (Love, 1973), Darveniza (Darveniza, et al., 1975) e Anderson (Anderson, 1982). Por outro lado, taxas consideravelmente mais altas, de até 2 vezes aqueles previstas pelo modelo utilizado no *Flash* (IEEE-1993 T&D Committee, 1993), são observadas para modelos que consideram raios de atração menores, tal como o de Brown & Whitehead (Brown & Whitehead, 1969). Nestes modelos eletrogeométricos, devido a um arco de exposição à falha de blindagem maior (Figura 2-8 e Figura 2-14) diferenças mais significativas quando se estuda o efeito do ângulo de incidência são observadas.

Tabela 3-8 Ajustes do Modelo Eletrogeométrico apresentados no Capítulo 2 empregados nas análisesparamétricas e de sensibilidade.

	Modelo Eletrogeométrico
1	(Armstrong & Whitehead, 1968)
2	(Brown & Whitehead, 1969)
3	(Love, 1973)
4	(Darveniza, et al., 1975)
5	(Anderson, 1982)
6	(IEEE-1985 T&D Committee, 1985)
7	(IEEE-1993 T&D Committee, 1993)

Tabela 3-9 Sensibilidade da taxa de flashover (desligamentos/100km/ano) à calibração do ModeloEletrogeométrico ($T_d = 70 dias de trovoada/ano$).

Modelo Eletrogeométrico	Taxa de Flashover (Desl./100 km/ano)			
	Flash	Flash (revisado)	IEEE Std 1243	Ângulo de Incidência
Armstrong & Whitehead	0,13	0,10	0,18	0,23
Brown & Whitehead		0,12	0,20	0,26
Love		0,02	0,04	0,05
Darveniza		0,02	0,05	0,06
Anderson		0,02	0,04	0,05
IEEE T&D (1985)		0,07	0,13	0,16
IEEE T&D (1993) / IEEE Std. 1243		0,06	0,11	0,14


Figura 3-5 Taxas de *flashover* (desligamentos/100km/ano) decorrentes de vários ajustes do EGM, numerados de acordo com a Tabela 3-8. ($T_d = 70 \ dias \ de \ trovoada/ano$).

3.3.5 Altura da torre

A Tabela 3-10 mostra o desvio nas taxas de *flashover* com relação à variação da altura da estrutura da torre de transmissão, para valores na faixa de \pm 25 % em relação ao caso base. A altura da torre modifica a posição vertical dos condutores e diferenças pronunciadas nas taxas de desligamento podem ser observadas. Como esperado, todas as metodologias preveem uma elevação da taxa de *flashover* a partir do incremento da altura da torre, uma vez que tanto uma diminuição na corrente mínima (I_c), devido a uma maior impedância de surto (Z_s), quanto um aumento na corrente máxima (I_m) são obtidos. Como pode ser inferido a partir da Figura 2-8 e da Figura 2-14, na aplicação do EGM, quanto maior a altura dos condutores em relação ao raio de atração para o solo, maior se torna o comprimento do arco de exposição dos cabos-fase, com um número relativamente menor de descargas incidindo sob o solo. Adicionalmente, observa-se que é também aumentada a diferença entre os valores das zonas de falha de blindagem e, consequentemente, das taxas de *flashover* quando se contrasta a consideração ou não do ângulo de incidência do canal de descarga. A Figura 3-6 amplia a análise em causa para as diferentes calibrações do modelo de incidência.

Altura da torre (m)	Taxa de Flashover (Desl./100 km/ano)			
	Flash	<i>Flash</i> (revisado)	IEEE Std. 1243	Ângulo de Incidência
18,35	0,03	0,01	0,03	0,04
21,41	0,07	0,03	0,06	0,07
24,47	0,13	0,06	0,11	0,14
27,53	0,21	0,10	0,17	0,22
30,59	0,30	0,15	0,25	0,35

Tabela 3-10 Sensibilidade da taxa de flashover (desligamentos/100km/ano) à altura da torre $(T_d = 70 \text{ dias de trovoada/ano}).$





(c)

Figura 3-6 Sensibilidade da taxa de *flashover* (*desligamentos*/100*km*/*ano*) à variação da altura da torre para vários ajustes do EGM, numerados de acordo com a Tabela 3-8. (a) *Flash* (revisado); (b) IEEE Std 1243; (c) Ângulo de incidência. ($T_d = 70 \ dias \ de \ trovoada/ano$).

3.3.6 Comprimento da cadeia de isoladores

Conforme se destacou anteriormente, os estudos de coordenação de isolamento a surtos atmosféricos visam definir os níveis mínimos de isolamento requeridos pelo sistema tendo-se em vista um desempenho adequado frente às descargas atmosféricas. Como evidencia a Equação (2-58), o comprimento da cadeia de isoladores é um parâmetro proeminente na definição da característica de suportabilidade do isolamento e consequentemente, sabe-se que este exerça influência significativa na quantificação do número de desligamentos. Considerando a importância deste parâmetro para o cálculo da taxa de *flashover*, diferentes valores de comprimento das cadeias de isoladores, menores e maiores que o caso base (1,314 m), são apresentados na Tabela 3-11. Tais valores são limitados entre o máximo e mínimo de isoladores empregados em sistemas de 138 kV (7 a 11). A Figura 3-7 estende a avaliação para vários ajustes do EGM.

Pode-se constatar que, como esperado, o aumento da cadeia de isoladores provoca uma diminuição no número de falhas da linha, acarretando em um melhor desempenho para a mesma, segundo todos os métodos de cálculo da taxa de *flashover*. Ademais, esta diminuição é não linear, porém observa-se um comportamento padronizado para os diferentes modelos eletrogeométricos. Aqueles modelos que conduzem a uma taxa de desligamentos mais conservadora, como os de Whitehead e co-autores, preveem um valor nulo para comprimentos da cadeia entre 3 e 3,5 m, enquanto que com o modelo de (Anderson, 1982), por exemplo, este valor seria obtido a partir de 2 m, o que neste caso corresponde a uma modificação em relação ao caso base de somente 0,686 m.

Número de isoladores	Comprimento da cadeia (m)	Taxa de Flashover (Desl./100 km/ano)			
		Flash	<i>Flash</i> (revisado)	IEEE Std. 1243	Ângulo de Incidência
7	1,022	0,15	0,07	0,15	0,19
8	1,168	0,14	0,07	0,13	0,16
9	1,314	0,13	0,06	0,11	0,14
10	1,460	0,11	0,05	0,09	0,11
11	1,606	0,10	0,05	0,07	0,09

Tabela 3-11 Sensibilidade da taxa de *flashover* (*desligamentos*/100km/ano) ao comprimento da cadeia de isolador ($T_d = 70 \ dias \ de \ trovoada/ano$).







Figura 3-7 Sensibilidade da taxa de *flashover* (*desligamentos*/100*km*/*ano*) à variação do comprimento da cadeia de isoladores para vários ajustes do EGM, numerados de acordo com a Tabela 3-8. (a) *Flash* (revisado); (b) IEEE Std. 1243; (c) Ângulo de incidência. $(T_d = 70 \ dias \ de \ trovoada/ano).$

3.3.7 Parâmetros de frequência de incidência geográfica e da onda de corrente da descarga

Outro aspecto de interesse prático corresponde à relação entre o nível ceráunico (T_d) e a densidade de descargas para o solo (N_g) e bem como aos parâmetros das distribuições da amplitude máxima da corrente de descarga. O valor de pico da corrente de descarga é um dos parâmetros mais importantes na determinação das sobretensões nas cadeias de isoladores, apresentando uma proporcionalidade direta com o valor máximo da sobretensão aplicada. Deste modo, há interesse prático na avaliação do comportamento dos índices de desempenho considerando diferentes ajustes para a distribuição de probabilidade de ocorrência deste parâmetro, que, em conjunto com a equação de frequência de incidência, caracterizam a região geográfica em que está inserida a linha de transmissão.

As Equações (3-1) a (3-3) resumem os referidos parâmetros adotados no *Flash* e, tendo-se em vista a linha de transmissão utilizada como teste (linha de transmissão do sistema CEMIG), tais equações apresentam também os correspondentes parâmetros associados à

região de Minas Gerais (Schroeder, 2001). A Figura 3-8, a Figura 3-9 e a Figura 3-10 ilustram as comparações gráficas entre as respectivas funções.

$$Ng = 0.04T_{d}^{1,25}$$
 (Flash)

$$Ng = 0.03T_{d}^{1,12}$$
 (Minais Gerais)

$$P(I > I_{0}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_{0}}{31}\right)^{2,6}}$$
 (Flash)

$$P(I > I_{0}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_{0}}{45}\right)^{4,7}}$$
 (Minas Gerais)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-1)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(3-2)
(

$$f_1(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{ln}I}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(I) - \ln(\bar{I})}{\sigma_{ln}}\right]^2}$$
(3-3)

em que:

$$ar{I} = 33,3$$
 (Flash)
 $\sigma_{ln} = 0,61$
 $ar{I} = 45,3$ (Minas Gerais)
 $\sigma_{ln} = 0,39$



Figura 3-8 Variação das relações $T_d x N_g$ pelo IEEE e referentes à Minas Gerais, Brasil.



Figura 3-9 Curvas de distribuição de probabilidade cumulativa do valor de pico da corrente de descarga.



Figura 3-10 Curvas de distribuição de probabilidade log-normal do valor de pico da corrente de descarga.

A Tabela 3-12 mostra a comparação entre as taxas de *flashover* obtidas quando são considerados os parâmetros sugeridos no guia IEEE Std. 1243 (e utilizados no *Flash*) e mediante adoção dos parâmetros sugeridos por (Schroeder, 2001).

Tabela 3-12 Sensibilidade da taxa de *flashover* (*desligamentos*/100km/ano) aos parâmetros característicos da frequência de incidência e da distribuição do valor pico da corrente da descarga atmosférica ($T_d = 70 \ dias \ de \ trovoada/ano$).

	Taxa de Flashover (Desl./100 km/ano)				
	Flash	Flash (revisado)	IEEE Std 1243	Ângulo de Incidência	
IEEE	0.40	0,06	0,11	0,14	
MG	0,13	0	0,05	0,06	

Pode-se verificar que os valores obtidos para as taxas são consideravelmente menores quando as equações que descrevem a região de Minas Gerais são utilizadas. Esse resultado é esperado uma vez que, a partir da Figura 3-8 Ng menor é obtido para um mesmo T_d e, como reforçam as Equações (2-53) e (2-61), as taxas de desempenho apresentam uma relação direta com esse parâmetro. Ademais, a Figura 3-9 e a Figura 3-10 indicam que as descargas atmosféricas na região de Minais Gerais são mais severas. Apesar de representarem solicitações aos isoladores mais intensas, tem-se, no entanto, que as falhas de blindagem ocorrem para valores pequenos de valor de pico de corrente. Deste modo, as correntes máximas determinadas pelo Modelo Eletrogeométrico, que possivelmente causam falha de blindagem tem uma maior probabilidade de serem excedidas, quando comparadas com as distribuições adotadas no *Flash*, culminando em uma redução pronunciada dos valores das taxas de *flashover*. A Figura 3-11 apresenta esta comparação para as várias calibrações do EGM. Destaca-se que, como indica a Figura 3-11 (a), caso fossem adotados os parâmetros de Minas Gerais, o Método de Anderson (implementado no programa *Flash*) resultaria em taxas de desligamento iguais a zero para todos os ajustes do EGM.

3.3.8 Método de Monte Carlo

Tendo-se em vista a viabilização de uma comparação direta com o programa base (*Flash*), o cálculo da taxa de desligamentos por *flashover* segundo a metodologia probabilística é realizado atribuindo aos parâmetros aleatórios uma dispersão estatística com valor médio/mediano igual aos valores adotados no *Flash*. Além disso, de maneira a ajustar o caso base a modelagens similares àquelas adotadas no programa, considera-se que:

 a) A onda de corrente é modelada por uma rampa retangular representada pelo valor máximo de corrente definido segundo a Equação (3-4).

$$P(I < I_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_0}{31}\right)^{2,6}}$$
(3-4)

 b) A característica tensão-tempo é adotada como modelo padrão para representar a suportabilidade da cadeia de isoladores, segundo a Equação (3-5).

$$V_f(t) = \left(400 + \frac{710}{t^{0.75}}\right)W$$
(3-5)

c) O efeito corona é modelado a partir da determinação da impedância de surto dos cabos fase a partir da Equação (3-6).

$$Z_{S} = 60 \sqrt{\ln\left(\frac{2h}{r}\right) \ln\left(\frac{2h}{R_{c}}\right)}$$
(3-6)

d) O EGM adotado é o mostrado na Equação (3-7).

$$r_{c} = 10I^{0.65} \qquad r_{s} = \gamma r_{c}$$

$$\gamma = \begin{cases} 0.36 + 0.17\ln(43 - y_{c}) & y_{c} \le 40 \ m \\ 0.55 & y_{c} > 40 \ m \end{cases}$$
(3-7)





Figura 3-11 Sensibilidade da taxa de *flashover* (*desligamentos*/100*km*/*ano*) aos parâmetros da distribuição do valor de pico da corrente e de frequência de incidência (*IEEE x MG*) para vários ajustes do Modelo Eletrogeométrico, numerados de acordo com a Tabela 3-8. (a) *Flash* (revisado), (b) IEEE Std 1243, (c) Ângulo de incidência ($T_d = 70 \ dias \ de \ trovoada/ano$).

A taxa de *flashover* calculada para as condições estabelecidas após 40.000 simulações é mostrada na Tabela 3-13. Destaca-se que todos os parâmetros, associados ao sistema de transmissão e às descargas atmosféricas, enumerados abaixo foram avaliados por meio de distribuições de probabilidade. As amostras obtidas são ilustradas da Figura 3-12 à Figura 3-16, em que foram consideradas as distribuições de probabilidade referidas na Tabela 2-3.

- a) Tensão de operação;
- b) Valor de pico da onda de corrente;
- c) Tempo de frente;
- Angulo de inclinação do canal de descarga;
- e) Ponto de localização do canal de descarga ao longo do vão.

Tabela 3-13 Comparação entre as taxas de *flashover* (*desligamentos*/100km/ano) segundo as abordagens determinística e probabilística (MMC) ($T_d = 70 \ dias \ de \ trovoada/ano$).

	MMC	Flash	<i>Flash</i> (revisado)	IEEE Std 1243	Ângulo de Incidência
Taxa de Flashover (Desl./100 km/ano)	0,21	0,13	0,06	0,11	0,14
Desvio (%)	-	∜ 38,10	↓ 71,43	↓ 47,62	↓ 33,33

Verifica-se que o valor da taxa de desligamentos prevista pelo Método de Monte Carlo (metodologia probabilística) é superior àquelas obtidas por meio dos métodos determinísticos. Isso se deve ao fato, principalmente, da possibilidade de consideração da variável tensão instantânea de operação no instante de incidência de descarga. Como se mostrou no subitem 2.4.2, a metodologia recomendada pelo IEEE 1243 não fornece meios para contemplar esse efeito. No Flash tal efeito é considerado somente no cálculo da taxa de desligamentos por backflashover. A Figura 3-17 e a Figura 3-18 (geradas para a Fase A do sistema teste) mostram que quando um tempo de frente de onda de $t_f = 2 \mu s$ é utilizado, a disrupção na cadeia de isoladores ocorre de fato em um tempo muito próximo de 6 µs, como adotado no Flash. Entretanto, ao considerar-se t_f como uma variável aleatória e permitir-se a avaliação longo de todo de suportabilidade ao 0 trecho da curva v-t $(0,1 a 20 \mu s)$, tem-se uma maior viabilidade à ocorrência de falha, o que também contribui para o aumento do valor da taxa de *flashover* calculada pelo Método de Monte Carlo.



Figura 3-13 Distribuição dos tempos de frente de onda.



Figura 3-14 Distribuição da posição do canal de descarga ao longo da linha.



Figura 3-15 Distribuição do ângulo de incidência do canal de descarga.



Figura 3-17 Representação da característica de suportabilidade do isolamento (v - t) e sobretensão aplicada à cadeia da Fase A, considerando a onda de corrente modelada por uma rampa retangular ($t_f = 2 \ \mu s$).



Figura 3-18 Mudança de estado para a avaliação da suportabilidade da cadeia de isoladores mostrada na Figura 3-17.

3.4 Síntese do capítulo

Neste capítulo estão descritos os principais resultados obtidos pelo pacote computacional desenvolvido, comparando-se os métodos de cálculo da taxa de desligamentos abordagens por falha de blindagem segundo determinística (Guia IEEE Std. 1243 e Flash) e probabilística (Método de Monte Carlo). Adicionalmente, é apresentada uma série de avaliações de sensibilidade paramétricas em relação aos principais parâmetros que descrevem o sistema de transmissão (tensão de operação, cadeia de isoladores) e o fenômeno físico (parâmetros de incidência geográfica e da onda de corrente de descarga).

Como exposto neste capítulo, existe uma dispersão numérica pronunciada tanto ao se compararem as diferentes simplificações para solução do desempenho adotadas entre os métodos determinísticos, quanto ao compararem-se as abordagens determinística e probabilística.

4 – CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

4.1 Síntese da dissertação e principais resultados

Neste trabalho, são apresentados os aspectos fundamentais envolvidos no desenvolvimento de um pacote computacional em *MATLAB*[®] para a avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas no contexto do fenômeno da falha de blindagem e segundo as abordagens determinística e probabilística. As principais modelagens eletromagnéticas e métodos compreendidos em tal desenvolvimento são descritos no Capítulo 2.

No Capítulo 3, com o auxílio da ferramenta desenvolvida, são realizados diversos estudos de sensibilidade em um sistema de transmissão (caso base) de 138 kV. Algumas análises paramétricas são consenso na literatura, como por exemplo, ajustes da expressão matemática do raio de atração; comprimento da cadeia de isolador; parâmetros de caracterização da forma de onda e da incidência de descargas atmosféricas, dentre outros. Contudo, os principais resultados (ainda objeto de discussão na literatura) são apresentados abaixo:

- a) Ângulo de Incidência da Descarga Atmosférica ⇒ verifica-se que a consideração do ângulo de incidência da descarga exerce uma influência apreciável no cálculo da taxa de *flashover*. Destaca-se que, embora uma classe de soluções relativamente extensa possa ser obtida a partir dos ajustes dos coeficientes da função densidade de probabilidade proposta por (Armstrong & Whitehead, 1968), como ressaltado em (Brown & Whitehead, 1969), tal distribuição não pode ser estimada com precisão. Ainda assim, acredita-se ser razoável prover a possibilidade de algum desvio em relação à vertical em detrimento da consideração de descargas somente perpendiculares à linha de transmissão. Destaca-se que tal conclusão é contrária ao que é apresentado em (Anderson, 1982) e (Hileman, 1999), qual seja, a inclusão do ângulo aumenta consideravelmente a complexidade do cálculo e, deste modo, a aproximação de somente de descargas verticais deve ser utilizada;
- b) Metodologias Determinísticas versus Probabilística ⇒ percebe-se uma significativa dispersão nas taxas de desempenho, de até aproximadamente 70% quando se comparam os resultados obtidos pelas abordagens determinística e probabilística. Dada a natureza altamente estocástica dos processos associados a estas taxas, sugere-se a utilização de

metodologias com caráter probabilístico, capazes de caracterizar de forma mais realística o comportamento dos parâmetros associados tanto ao sistema de transmissão quanto ao fenômeno físico descarga atmosférica. Destaca-se, adicionalmente, que a metodologia probabilística, aqui implementada por meio do Método de Monte Carlo, permite que: i) modificações nos dados de entrada (tais como parâmetros das distribuições de probabilidade) e ii) métodos e modelos mais elaborados (tais como modelo de incidência, efeito corona, suportabilidade da cadeia de isoladores etc.) sejam incorporados ao algoritmo base de modo significativamente mais simples.

- c) Em oposição ao que é apresentado em (Anderson, 1982), o método simplificado para solução da equação integral da taxa de falha de *flashover* deve ser utilizado apenas para estimativas rápidas da mesma e não pode ser considerado como equivalente à equação recomendada pelo Guia IEEE Std. 1243, pois, como demonstrado nesta dissertação, diferenças de até aproximadamente 80 % são obtidas.
- d) A inconsistência existente no *Flash* 1.9, associada ao emprego da determinação da máxima corrente que causa falha de blindagem, superestima a taxa de desligamentos por falha de blindagem (em torno de 53%). Vale ressaltar que, deste modo, a manutenção de tal inconsistência acarreta taxas mais próximas das que seriam obtidas com a solução numérica da integral (para todas as correntes) e com a consideração da inclusão do ângulo de incidência.

4.2 Propostas de continuidade

Os estudos paramétricos realizados nesta dissertação possibilitam a visualização de diversos trabalhos de continuidade, dentre os quais, citam-se os seguintes:

- Emprego de um modelo de incidência que incorpore considerações físicas mais complexas na modelagem do processo de interação entre descargas atmosféricas e estruturas, como os modelos eletrogeométricos modificados ou os modelos de progressão do líder. Neste contexto, o modelo SLIM foi validado através da comparação com experimentos utilizando descargas provocadas por foguetes, e estima de forma consistente as propriedades físicas do canal de descarga (ou líder) ascendente, reduzindo várias incertezas em relação a outros modelos de incidência;
- Representação da onda de corrente de descarga por meio de funções que permitam a reprodução de sua característica côncava (frente de onda), como por exemplo, a função de F. Heidler;
- Inclusão de modelagens mais elaboradas (fisicamente consistentes) da suportabilidade da cadeia de isoladores (métodos de integração e de progressão do líder);

- Utilização de programas de transitórios eletromagnéticos, como o ATP (*Alternative Transients Program*), para proporcionar distribuições temporais das sobretensões atmosféricas mais realistas;
- Aperfeiçoamento das rotinas desenvolvidas e migração para uma linguagem de maior desempenho, como por exemplo, a linguagem C++;
- 6. Incorporação das descargas atmosféricas subsequentes;
- Consideração do efeito de objetos próximos à linha de transmissão na modelagem da incidência das descargas atmosféricas;
- Contraste dos resultados observados para as diferentes metodologias, modelos e parâmetros com dados de campo/históricos do desempenho de linhas de transmissão do sistema CEMIG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIEE Committee Report, 1950. A Method of Estimating Lightning Performance of Transmission Lines. *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 69(3), pp. 1187-1196.

Alvarez, C. G. C., 2011. Um Ambiente Computacional Para Análise de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente às Descargas Atmosféricas, Belo Horizontente: Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEL), Associação Ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG).

Anderson, B. R. & Eriksson, J. A., 1980. Lightning Parameters for Engineering Application. *Electra,* Volume 69, pp. 65-102.

Anderson, J. G., 1982. Lightning Performance of Transmission Lines. In:: *Transmission Line Reference Book , 345 kV and Above.* 2^a ed. California: Electric Power Research Institute, pp. 545-598.

Arevalo, L. & Cooray, V., 2009. *Influence of multiple upward connecting leaders initiated from the same structure on the lightning attachment process.* Curitiba, International Symposium on Lightning Protection, X SIPDA, pp. 221-226.

Armstrong, H. R. & Whitehead, E. R., 1964. A Lightning Stroke Pathfinder. *IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems*, 83(12), pp. 1223-,1227.

Armstrong, H. R. & Whitehead, E. R., 1968. Field and Analytical Studies of Transmission Lines Shielding. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 87(1), pp. 270,281.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2005. *NBR 5419 - Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas,* Rio de Janeiro: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Becerra, M. & Cooray, V., 2006. A self-consistent upward leader propagation model. *Jornal of Physics D: Applied Physics*, 39(16), pp. 3708-3715.

Becerra, M. & Cooray, V., 2008. On the velocity of positive connecting leaders associated with negative downward lightning leaders. *Geopshycal Research Letters,* Volume 35.

Berger, K., Anderson, R. B. & Kröninger, H., 1975. Parameters of Lightning Flashes. *Electra*, Volume 41, pp. 23-27.

Brown, G. W. & Whitehead, E. R., 1969. Field and Analytical Studies of Transmission Lines Shielding. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 88(5), pp. 617-626.

Cigré Working Group 33.01, 1991. Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines. *Working Group 01 (Lightning) of Study Committee 33 (Overvoltages and insulation coordination),* Issue Cigre Technical Brochure 63.

Conti, A. D. & Visacro, S., 2007. Analytical Representation of Single- and Double-Peaked Lightning Current Waveforms. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 49(2), pp. 448-451.

Cooray, V. & Becerra, M., 2010. Attachment of lightning flashes to grounded structures. In:: *Lightning Protection.* London: The Institution of Engineering and Technology (IET), pp. 165-268.

Corray, V., Rakov, V. & Theethayi, N., 2007. The lightning striking distance—Revisited. *Journal of Electrostatics*, 65(5–6), pp. 296-306.

Darveniza, M., Popolansky, F. & Whitehead, E. R., 1975. Lightning Protection of UHV Transmission Lines. *Electra*, Jul, Volume 41, pp. 39,69.

Darveniza, M. et al., 1979. Modelling for Lightning Performance Calculations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 98(6), pp. 1900-1908.

Dellera, L. & Garbagnati, E., 1990. Lightning Stroke Simulation by Means of the Leader Propagation Model Parts I and II. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Oct, 5 and discussion in vol. 6, no.1, pp. 456,460(4), pp. 2009-2029.

Dubi, A., 1999. *Monte Carlo Applications in Systems Engineering*. 1^a ed. West Sussex, England: Wiley.

Eriksson, A. J., 1987. An Improved Electrogeometric Model for Transmission Lines Shielding Analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Jul, 2(3), pp. 871,886.

Fonseca, C. d. S., 1987. Sobretensões Atmosféricas. In:: *Transitórios elétricos e coordenação de isolamento - aplicação em sistemas de potência de alta tensão.* Niterói: Universidade Federal Fluminense Editora Universitária (EDUFF) & Furnas Centrais Elétricas S. A.

Golde, R. H., 1977. Lightning Protection. London, U.K.: Academic Press.

Hileman, A. R., 1999. *Insulation Coordination for Power Systems.* Boca Raton, FL: CRC Press Taylor & Francis Group.

IEC 62305 1-4, 2006. Protection against lightning - Part 1: General principles, Part 2: Risk management, Part 3: Physical damage to structures and life hazard, Part 4: Electrical and electronic systems within structures, s.l.: International Electrotechnical Commission (IEC).

IEEE Std 1243, 1997. *IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines,* Institute of Electrical and Electronics Engineers: Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society (Reaffirmed 2008).

IEEE Std 1313.1, 1996. *IEEE Standard for Insulation Coordination - Definitions, Principles, and Rules,* Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE Power & Energy Society (Reaffirmed 2002).

IEEE Std 1410, 2010. *IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines,* Institute of Electrical and Electronics Engineers: Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society.

IEEE-1985 T&D Committee, 1985. A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,* 104(4), pp. 918,932.

IEEE-1993 T&D Committee, 1993. Estimating lightning performance of transmission lines II - Updates to analytical models. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 8(3), pp. 1254,1267.

Lee, R., 1978. Protection zone for buildings against lightning strokes using transmission line protection practice. *IEEE. Trans. Ind. Appl,* Volume 14, p. 465–70.

Lobato, A. T. et al., 2013. *Analysis of the Cumulative Probability Distribution of the Stroke Angle in Lightning Incidence to Three-Phase Overhead Transmission Lines.* Belo Horizonte, Brazil, International Symposium on Lightning Protection, XII SIPDA, pp. 128,133.

Lobato, A. T. et al., 2014. *Influence of Considering a Stroke Angle Distribution on the Estimation of the Shielding Performance of Transmission Lines: Effects of Electrogeometric Models.* Manaus, GROUND'2014 & 6th LPE (International Conference on Grounding and Earthing & 6th International Conference on Lightning Physics and Effects).

Love, E. R., 1973. *Improvements on Lightning Stroke Modeling and Applications to Design of EHV and UHV Transmission Lines,* University of Colorado, Denver: M. Sc. Thesis.

Mariano, J. A. d. S., 2012. Um Ambiente Computacional para Cálculos de Sobretensões Atmosféricas e Desempenho de Linhas de Transmissão Segundo uma Abordagem Estocástica, São João del-Rei: Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEL), Associação Ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG).

Martinez, J. A. & Castro-Aranda, F., 2006. Influence of the Stroke Angle on the Flashover Rate of an Overhead Trasnmission Line. *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*.

Martinez-Velasco, J. A., 2010. *Power System Transients - Parameter Determination.* Boca Raton, FL: CRC Press Taylor & Francis Group.

Martinez-Velasco, J. A. & Aranda, F. C., 2002. Análisis de sobretensiones de origen atmosférico en líneas aéreas de transporte. Parte II: Cálculo estadístico de sobretensiones. *Revista Iberoamericana del ATP*, 4(1).

McCann, G. D., 1943. The Effect of Corona on Coupling Factors Between Ground Wires and Phase Conductors. *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Volume 62, pp. 818-826.

Mikropoulos, P. N. & Tsovilis, T. E., 2012. Estimation of the Shielding Performance of Overhead Transmission Lines: The Effects of Lightning Attachment Model and Lightning Crest Current Distribution. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19(6), pp. 2155-2164.

Mikropoulos, P. & Tsovilis, T., 2008. Striking Distance and Interception Probability. *IEEE Transactions on Power Delivery*, July, 23(3), pp. 1571-1580.

Mousa, A. M. & Srivastava, K. D., 1988. Effect of Shielding by Trees on the Frequency of Lightning Strokes to Power Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Apr, 3(2), pp. 724,732.

Mousa, A. M. & Srivastava, K. D., 1990. Modelling of power lines in lightning incidence calculations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Jan, 5(1), pp. 303,310.

Ouchi, K. et al., 1997. Observation of Lightning at 500kV Transmission Lines (Part 1). *IEEJ Trans. PE*, 117(12), pp. 1561-1567.

Rakov, V. A. & Uman, M. A., 2003. *Lightning: Physics and Effects.* s.l.:Cambridge Univ. Press .

Rizk, F. A. M., 1990. Modeling of Transmission Line Exposure to Direct Lightning Strokes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Oct, 5(4), pp. 1983-1990.

Rusck, S., 1958. Induced Lightning Over-Voltages on Power-Transmission Lines with Special Reference to Over-Voltage Protection of Low-Voltage Networks. *Transactions of Royal Institute of Technology (Stockholm, Sweden),* Issue 120.

Salari Filho, J. C., 2006. *Efeito das Descargas Atmosféricas no Desempenho de Linhas de Transmissão - Modelagens nos Domínios do Tempo e da Frequência,* Rio de Janeiro: Tese de Doutorado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Schroeder, M. A. d. O. et al., 2014. *Analysis of the Cumulative Probability Distribution of the Stroke Angle in Lightning Incidence to Transmission Lines.* Lyon, France, 2014 CIGRÉ - International Colloquium on Lightning and Power Systems .

Schroeder, M. A. O., 2001. *Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas: Aplicação às Medições da Estação do Morro do Cachimbo*, Belo Horizonte: Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Shafaei, A., Gholami, A. & Shariatinasab, R., 2011. Advanced statistical method for evaluating of lightning performance of overhead transmission lines based on accurate modelling and considering non-vertical strokes. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2011 24th.*

Soares, A. J., 2001. *Modelagem de Linhas de Transmissão para Avaliação de Desempenho Frente a Descargas Atmosféricas,* Belo Horizonte: Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Soares, A. J., Schroeder, M. A. d. O. & Visacro, S., 2005. Transient Voltages in Transmission Lines Caused by Direct Lightning Strikes. *IEEE Transactions on Power Delivery,* 20(2), pp. 1447-1452.

Visacro, S., 2005. *Descargas Atmosféricas: uma abordagem de engenharia.* São Paulo: Artliber.

Wagner, C. F. & Hileman, A. R., 1961. The Lightning Stroke- II. *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems,* Apr, 80(3), pp. 622-642.

Young, F. S., Clayton, J. M. & Hileman, A. R., 1963. Shielding of Transmission Lines. *AIEE Transactions on Power Apparaturs Systems,* Volume S82, pp. 132,154.

Zanetta Júnior, L. C., 2003. Sobretensões Atmosféricas. In:: *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência.* São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo (Edusp).