

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Elétrica - PPGEE

# **Desempenho de linhas de distribuição frente a descargas atmosféricas indiretas: análise de sensibilidade das diferentes modelagens**

por

**Rosembergue Pereira de Souza**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Engenharia de Potência

Linha de Pesquisa: Compatibilidade Eletromagnética e Qualidade de Energia

Orientador: Prof. Dr. Ivan José da Silva Lopes

Belo Horizonte

Junho - 2011

Dissertação de Mestrado

**Desempenho de linhas de distribuição frente a  
descargas atmosféricas indiretas: análise de  
sensibilidade das diferentes modelagens**

**Rosembergue Pereira de Souza**

Dedico essa dissertação a  
minha família e amigos.  
À minha mãe Marly Sátiro  
e ao meu pai Roberto  
Carlos.

# Agradecimentos

Primeiramente agradeço à Deus por ter me concedido a oportunidade de crescer e me aprimorar, com humildade e respeito à todos.

À minha mãe Marly Sátiro, que me deu a vida, cuidou de mim e acreditou que eu era capaz de alcançar todos os meus sonhos.

Ao meu pai Roberto Carlos, que me deu todo suporte e orientações para que pudesse vencer os obstáculos de minha vida.

Ao Prof. Dr. Ivan José da Silva Lopes, orientador desta dissertação, pela sua serenidade e visão que por muitas vezes impediram minha ansiedade e inexperiência de atropelarem o andamento deste trabalho. Oportunamente, destaco seu empenho, compreensão, bom senso e sabedoria, sempre com sugestões e observações valiosas que se concretizaram como pilar de sustentação dessa dissertação.

Aos professores José Osvaldo, Wallace Couto, Glássio Miranda, Selênio Silva e Hani Camille pela educada recepção e apoio.

Aos meus colegas de Laboratório, Ailton, Emerson e David, que acompanharam meu aprendizado, crescimento e realização profissional e pessoal.

Aos Funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, pelo auxílio, cortesia e carinho despendidos no atendimento e esclarecimentos prestados durante o curso, os quais permitiram a realização desta pesquisa.

Aos amigos, Gustavo Silva, Douglas Pedroso, Ana Paula Souza e Tiago James que me acolheram tantas vezes em Belo Horizonte.

Ao amigo Tiago Zanotelli (Colatina), pela saudável e valiosa convivência durante o primeiro ano de mestrado.

Aos amigos Guilherme e Alison pela amizade e suporte durante as disciplinas do curso de mestrado.

Ao Coral da Fale pelos maravilhosos momentos de alegria, música e dança.

À Casa da Incoerência pela ótima convivência no Rio de Janeiro.

Aos amigos Vladimir e Luna pelo apoio e motivação.

Aos amigos Cláudio e Suzana pelo o abrigo nas idas e vindas a Belo Horizonte.

Aos amigos do Inmetro pelo apoio e compreensão.

Àqueles que foram importantes no desenvolvimento desse trabalho e não foram citados, não fiquem tristes, o fato de não terem recebido citação não é símbolo de irreconhecimento

meu, mas sim, prova de que minha memória é fraca.

E por fim, agradeço a todos aqueles que por ventura disseram que tudo iria dar certo, vocês tinham razão, realmente deu.

# Resumo

Distúrbios em linhas de distribuição de energia elétrica são causados principalmente por descargas atmosféricas, especialmente por descargas que atingem a região próxima à linha. O cálculo de desempenho de uma linha de distribuição frente a descargas atmosféricas tem muitas incertezas devido à sua natureza aleatória. Deste modo, vários aspectos do fenômeno precisam ser modelados, por vezes, simplificados, para se conduzir a avaliação do desempenho da linha.

Nos últimos anos, diversos autores reconheceram que a resistividade do solo desempenha um papel importante nas tensões induzidas por descargas atmosféricas. Atualmente, há um consenso de que o efeito global da resistividade do solo é o aumento da tensão induzida em uma linha, quando comparado à situação em que essa linha está sobre um solo ideal.

Este trabalho almejou desenvolvimento de uma análise de sensibilidade que contemplasse diferentes modelos utilizados nos métodos de cálculo de desempenho de uma linha de distribuição de energia elétrica e como tais modelos influenciariam a estimativa desse desempenho. Nesse intuito, foi proposto um método para estimar o desempenho de uma linha de distribuição de energia elétrica levando em conta a resistividade do solo. Logo após, investigou-se a influência dos diferentes modelos usados na literatura para prever o desempenho da linha de distribuição frente a descargas atmosféricas indiretas.

# Abstract

The insulation design of distribution lines has been carefully reconsidered in the last years because of the widespread use of sensitive electronic devices in the power system and the increasing demand on the power quality. Disturbances to power distribution lines are mainly caused by lightning, especially by indirect lightning. The lightning performance evaluation has many uncertainties. Due to the random nature of lightning, different aspects of the phenomenon are modeled in performance evaluation studies.

In recent years, many authors recognized that the soil resistivity plays an important role in the induced voltages by lightning. Nowadays, there is a general agreement that the overall effect of the soil resistivity is to increase the induced voltage on a line when compared to a perfectly conductive soil.

The present work deals with a sensitivity analysis of the influence of the soil resistivity in the performance evaluation using different models proposed in the literature to estimate the indirect lightning flashover rates of overhead distribution lines.

# Sumário

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>   | <b>9</b>  |
| 1.1      | Relevância do Tema . . . . .  | 9         |
| 1.2      | Breve Histórico . . . . .   | 10        |
| 1.3      | Objetivo do Trabalho . . . . .  | 12        |
| 1.3.1    | Objetivos Específicos . . . . .   | 12        |
| 1.4      | Estrutura da Dissertação . . . . .  | 13        |
| <b>2</b> | <b>Método DDI</b>   | <b>14</b> |
| 2.1      | Descrição geral do Método DDI . . . . .   | 14        |
| 2.2      | Geração de observações aleatórias dos parâmetros das descargas atmosféricas                                   | 17        |
| 2.2.1    | Distribuição das correntes de pico das descargas atmosféricas . . . . .                                       | 17        |
| 2.2.2    | Ponto de incidência de uma descarga atmosférica . . . . .   | 19        |
| 2.3      | O modelo eletrogeométrico, discriminação entre as descargas diretas e indiretas . . . . .                     | 20        |
| 2.4      | O cálculo do valor de pico da tensão induzida por uma descarga considerando a resistividade do solo . . . . . | 21        |
| 2.5      | O cálculo do número de disrupções por 100 <i>km</i> por ano . . . . .   | 22        |
| <b>3</b> | <b>Validação do Método DDI</b>  | <b>24</b> |
| 3.1      | Condições de simulação . . . . .  | 24        |
| 3.2      | Número de eventos a ser utilizado nas simulações . . . . .  | 24        |
| 3.3      | Gerador de números aleatórios . . . . .   | 25        |
| 3.4      | Geração dos dados para corrente de retorno . . . . .  | 26        |
| 3.4.1    | As curvas de distribuição estatística para os valores de pico da corrente de retorno . . . . .                | 26        |
| 3.4.2    | Testes com o conjunto de observações aleatórias geradas para a corrente de retorno . . . . .                  | 26        |
| 3.5      | Comparação com outros resultados apresentados na literatura . . . . .   | 28        |
| <b>4</b> | <b>Resultados e discussões</b>  | <b>30</b> |

---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.1      | Investigação da influência do modelo eletrogeométrico na determinação do desempenho de uma linha de distribuição . . . . .               | 30        |
| 4.2      | Investigando da influência dos modelos usados para representar a velocidade da corrente de retorno de uma descarga atmosférica . . . . . | 35        |
| 4.3      | Comparação do Método DDI com o procedimento do guia IEEE Std 1410:2004 em uma forma adaptada . . . . .                                   | 37        |
| <b>5</b> | <b>Conclusão e propostas de continuidade</b>   | <b>40</b> |
| 5.1      | Propostas de continuidade . . . . .  | 41        |
| <b>A</b> | <b>Método do Guia IEEE Std 1410:2004</b>   | <b>42</b> |

# Lista de Tabelas

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Parâmetros dos Modelos Eletrogeométricos . . . . .   | 20 |
| 3.1 | Comparação entre os valores esperados e obtidos para a probabilidade de<br>uma valor de pico da corrente de retorno ser menor ou igual a um valor de<br>$I_p$ para a curva de distribuição de Anderson-Erikson . . . . . | 28 |
| 4.1 | Parâmetros dos Modelos Eletrogeométricos . . . . .   | 31 |
| 4.2 | Descargas diretas e indiretas por EGM . . . . .  | 34 |

# Lista de Figuras

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.1 | Fluxograma simplificado do Método DDI. . . . .  | 16 |
| 2.2 | Ilustração do método da Transformada Inversa [26]. . . . .  | 17 |
| 2.3 | Faixa de incidência das descargas geradas nas simulações. . . . .   | 19 |
| 2.4 | Ilustração das distâncias de atração do modelo eletrogeométrico, adaptado de [2]. . . . .   | 21 |
| 3.1 | Histograma de valores aleatórios entre 0 e 1 gerados pela função <i>rand</i> do <i>MATLAB</i> <sup>®</sup> . . . . .  | 25 |
| 3.2 | Comparação entre a distribuição de probabilidade acumulada esperada e obtida para os valores de pico da corrente de retorno. . . . .  | 27 |
| 3.3 | Comparação do Método DDI com os resultados obtidos no Guia IEEE Std 1410:2004, $\rho = 0 \Omega m$ . . . . .  | 28 |
| 4.1 | Comparação entre as distâncias mínimas de atração obtidas pelos EGMs estudados neste trabalho em função do valor de pico da corrente de retorno. . . . .  | 31 |
| 4.2 | Comparação entre os números de disrupções obtidos através dos três modelos eletrogeométricos estudados neste trabalho usando o Método DDI para valores de resistividade do solo variando de 0 a 1000 $\Omega m$ . . . . . | 33 |
| 4.3 | Comparação entre as abordagens usadas neste trabalho para velocidade relativa da corrente de retorno em função do valor de pico da corrente de retorno. . . . .   | 36 |
| 4.4 | Comparação entre dois tipos de abordagem para a velocidade da corrente de retorno usando o Método DDI variando a resistividade do solo. . . . .   | 36 |
| 4.5 | Comparação entre o Método DDI e o método do guia IEEE Std 1410:2004 em sua forma adaptada variando a resistividade do solo. . . . .   | 38 |

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Relevância do Tema

A estimativa do desempenho de uma linha de distribuição de energia elétrica frente a descargas atmosféricas é muito importante para o projeto de seu sistema de proteção, porque as descargas atmosféricas são a maior causa de faltas nos sistemas de distribuição. Essas faltas provocam interrupções, que por sua vez, causam distúrbios em dispositivos eletrônicos sensíveis amplamente usados na indústria [2], [3].

Geralmente, expressa-se o desempenho de uma linha de distribuição frente a descargas atmosféricas através do número de desligamentos por 100 *km* por ano. A estimativa do número de desligamentos da linha apresenta diversas incertezas, devido, principalmente, à natureza aleatória das descargas atmosféricas [13]. Alguns estudos mostram que a densidade de descargas atmosféricas por *km*<sup>2</sup> por ano possui um desvio padrão de 20 a 50% da média em uma região de 100 *km*<sup>2</sup> [2]. Além disso, a estimação do desempenho é afetada pelo modelo que descreve o acoplamento da descarga com a linha, pela distribuição das correntes de descarga adotada, pela modelagem do mecanismo de indução e pelo procedimento estatístico utilizado no cálculo do desempenho [4].

As faltas originadas por descargas atmosféricas acontecem devido a descargas diretas na linha e descargas que atingem sua vizinhança. Descargas diretas em linhas desprotegidas geralmente causam desligamentos [5], [6], e não são o foco desse trabalho. Por outro lado, distúrbios nas linhas de distribuição de energia elétrica são causados, na maioria das vezes e com grande frequência, por tensões induzidas por descargas indiretas. Essas perturbações podem causar danos em equipamentos de distribuição, tais como: transformadores de distribuição, fusíveis e chaves a óleo, principalmente quando as descargas acontecem próximas a tais equipamentos [7].

Estudos mostram que, no sudeste brasileiro, as descargas atmosféricas respondem por 30 % das interrupções acidentais no sistema de distribuição de energia elétrica [8], sendo que, a maioria desses casos ocorrem devido às tensões induzidas por descargas indiretas,

já que elas acontecem com maior frequência do que as descargas diretas [9].

Diversos fatores podem exercer influência sobre as tensões induzidas. Dentre tais fatores, destacam-se : intensidade e a velocidade da corrente de retorno, a distância do ponto de incidência da descarga à linha, o tempo de frente da corrente de retorno, a altura da linha e a condutividade do solo. Nos últimos anos, vários autores reconheceram a importância do papel que a condutividade do solo exerce sobre as tensões induzidas [10], [11], [12], [3]. Hoje, existe um consenso de que o efeito global da condutividade finita do solo é o de aumentar o valor máximo da tensão induzida quando comparado com o valor obtido considerando-se o solo ideal [10].

Portanto, o conhecimento do comportamento das tensões induzidas e dos métodos utilizados na determinação do número de desligamentos de uma linha causados por descargas atmosféricas indiretas é de grande importância para a melhoria da qualidade da energia, uma vez que tais surtos podem frequentemente atingir amplitudes elevadas, além de apresentarem, em geral, alta frequência de ocorrência.

## 1.2 Breve Histórico

Neste breve histórico, são considerados os principais trabalhos que discorreram sobre as tensões induzidas por descargas atmosféricas, bem como sobre o cálculo de desempenho de linhas de distribuição frente a descargas atmosféricas.

Um dos primeiros trabalhos sobre tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas aéreas foi atribuído a Wagner em 1908 *apud* [15]. Nesse trabalho, Wagner argumentava que a carga na nuvem induzia uma carga sobre a linha aérea e que, quando havia uma descarga da nuvem, a carga sobre a linha era liberada dando origem, na linha, a ondas viajantes de corrente e tensão.

Em 1942, Wagner e MacCann desenvolveram uma abordagem diferente para as tensões induzidas por descargas atmosféricas. Nessa época, eles consideraram que as tensões induzidas tinham como fontes as componentes do processo de descarga atmosférica incluindo os efeitos da corrente de retorno da descarga. Usando simples modelos, eles mostraram que as descargas de nuvem para nuvem tinham pouco efeito sobre a tensão induzida em linhas. No entanto, as descargas para o solo próximas a linha tinham efeitos apreciáveis, *apud* [15].

Em 1957, dentre as teorias para o cálculo de tensões induzidas por descarga atmosférica, destacou-se a teoria de Sune Rusck [14]. Em seu trabalho, Rusck partiu de uma modelagem para corrente de retorno e calculou o campo elétrico originado por essa corrente na superfície do solo, a partir do valor do campo e da configuração de uma linha de transmissão multifilar, Rusck determinou o valor da tensão resultante na linha, *apud* [19].

Em 1961, Anderson publicou um dos mais célebres trabalhos para o cálculo de desempenho de uma linha de transmissão de energia elétrica [18]. Nesse trabalho, Anderson

apresentou o passo a passo de uma sistemática para o cálculo de desempenho de uma linha de transmissão de energia elétrica usando o método de Monte Carlo.

Em 1990, Lopes apresentou em sua dissertação de mestrado [16] um trabalho sobre o cálculo de tensão induzida baseado na teoria de Rusck. Este trabalho resultou em um programa de uso dedicado, aplicável a linhas aéreas monofásicas e cabos subterrâneos. Também naquele ano, um grupo de trabalho formado pelos principais pesquisadores da área na época publicou um artigo em que se apresentou uma metodologia simplificada para se estabelecer o desempenho de uma linha de distribuição frente a descargas atmosféricas [5]. Nesse trabalho, foram consideradas as faltas provocadas tanto por descargas diretas como por descargas indiretas.

Ainda em 1990, Zeddami e Degauque, em [33], realizam pela primeira vez o cálculo do campo elétrico produzido por uma descarga atmosférica considerando a condutividade finita do solo *apud* [34].

Em 1992, Starling desenvolveu em sua dissertação de mestrado [17] um programa computacional para o cálculo de desempenho de uma linha frente a descargas atmosféricas baseado no trabalho de Lopes [16] e no método de Monte Carlo.

Em 1994, Paulino em sua tese de doutorado [19], apresentou uma contribuição para o cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas bem como apresentou uma rotina computacional para a estimação de desempenho de uma linha aérea de distribuição frente a descargas atmosféricas.

Em 1997, foi lançado o Guia IEEE Std 1410 [1] com a intenção de identificar os fatores que contribuíam para a causa de faltas por descargas atmosféricas em linha aéreas de distribuição de energia elétrica, além de dar sugestões que poderiam melhorar o desempenho das linhas de distribuição frente a tais descargas.

Em 2000, Martinez *et al* apresentaram um estudo comparativo [13] para o cálculo de desempenho de uma linha de distribuição. Nesse trabalho, Martinez *et al* verificaram que há diferenças entre os métodos de obtenção do número de desligamentos de uma linha originados por descargas indiretas. Ainda nesse trabalho, Martinez *et al* evidenciaram a necessidade de maiores estudos sobre a influência da velocidade da corrente de retorno.

Em 2004, foi publicada a primeira revisão do Guia IEEE Std 1410 [2], esta versão muda a formatação do texto proposto na versão de 1997 e acrescenta informações das pesquisas feitas na área até então.

Em 2006, Ávila *et al* apresentaram um trabalho [20] em que é usado o sistema de localização de descargas atmosféricas para se avaliar o real desempenho de linhas de distribuição rural frente a descargas atmosféricas.

Em 2007, Borghetti *et al* [6] apresentaram uma metodologia para estimação do desempenho de uma linha de distribuição levando-se em conta a resistividade do solo e usando o método de Monte Carlo. Nesse trabalho, os autores fizeram uma comparação com o Guia IEEE Std 1410:2004.

Em 2010, Paulino *et al* em [12] apresentaram uma fórmula aproximada para estimar o valor de pico da tensão induzida por uma descarga atmosférica numa linha infinita considerando a resistividade do solo. Uma das principais características deste trabalho é que a fórmula para o valor de pico da tensão induzida foi deduzida considerando que a forma para a corrente de retorno era um degrau.

No início de 2011, Paulino *et al* em [12] apresentaram uma nova fórmula aproximada para estimar o valor de pico da tensão induzida por uma descarga atmosférica numa linha infinita considerando a resistividade do solo. Neste trabalho, a fórmula para o valor de pico da tensão induzida foi deduzida considerando que a corrente de retorno tinha uma forma trapezoidal e seu tempo de frente era o valor típico de  $3,8 \mu s$ .

Como se vê, a evolução das pesquisas na área de tensões induzidas por descargas atmosféricas permitiu a incorporação de novos modelos ao fenômeno. Sabe-se que a estimação do desempenho de uma linha de distribuição está diretamente ligada às tensões induzidas por descargas atmosféricas. Assim, diante das incertezas propiciadas pela aleatoriedade das descargas atmosféricas, faz-se necessário uma investigação das modelagens atualmente existentes na literatura para se quantificar a influência desses modelos nos resultados de estimativa de desempenho de uma linha de distribuição.

## 1.3 Objetivo do Trabalho

Este trabalho tem por objetivo desenvolver uma análise de sensibilidade que contemple diferentes modelos utilizados nos métodos de cálculo de desempenho de linhas de distribuição de energia elétrica e avaliar como tais modelos podem influenciar na estimativa de desempenho.

### 1.3.1 Objetivos Específicos

1. Propor um método para estimar o desempenho de uma linha de distribuição de energia elétrica frente a descargas atmosféricas indiretas levando-se em conta a resistividade do solo;
2. Investigar a influência dos diferentes modelos usados na literatura para estimar o desempenho de uma linha de distribuição frente a descargas indiretas levando-se em conta os efeitos de um solo real. Essa investigação contempla três modelos eletrogeométricos e duas abordagens usadas para a consideração da velocidade relativa da corrente de retorno.
3. Comparar o método proposto com o método do Guia IEEE Std 1410:2004 adaptado de modo a considerar a influência da resistividade do solo no cálculo do valor de pico da tensão induzida por uma descarga indireta.

## 1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos.

O Capítulo 2 propõe um método para a estimação do desempenho de uma linha de distribuição frente a descargas indiretas levando em conta a resistividade do solo. O método de Monte Carlo, os tratamentos estatísticos dados aos parâmetros das descargas atmosféricas, o cálculo do valor de pico das tensões induzidas por descargas atmosféricas e os critérios para a ocorrência de uma interrupção numa linha de distribuição são apresentados.

O Capítulo 3 apresenta a validação do método proposto para a estimação do desempenho de uma linha de distribuição.

O Capítulo 4 apresenta as simulações realizadas com o método proposto, bem como as discussões originadas pela observação dos resultados dessas simulações.

O Capítulo 5 encerra o texto retomando os principais pontos abordados durante o trabalho e as conclusões obtidas a partir do estudo realizado. As propostas de continuidade para o trabalho são apresentadas ao final do trabalho.

# Capítulo 2

## Método DDI

O desempenho de uma linha de distribuição é usualmente representado por uma curva com o número de disrupções por 100 *km por ano versus* o nível de isolamento da linha [2], [6]. Neste capítulo, é proposto um método para se obter esse tipo de curva. Tal procedimento tem como base o método de Monte Carlo.

O Método de Monte Carlo consiste na simulação de variáveis aleatórias a fim de resolver problemas numericamente [25]. Este método deve sua origem aos esforços de J. von Neuman e S. Ulam que, em 1949, publicaram o artigo “The Monte Carlo Method”. O nome dessa técnica matemática vem da cidade do principado de Mônaco, Monte Carlo, conhecida por seus cassinos, roletas e jogos de azar.

### 2.1 Descrição geral do Método DDI

Neste trabalho, o método proposto é denominado Método DDI, um acrônimo para Desempenho frente a Descargas Indiretas. Como as linhas de distribuição são as que mais sofrem com os efeitos de descargas indiretas, fica implícito o alvo de aplicação do Método DDI. Para o cálculo do desempenho de uma linha de distribuição de energia elétrica usando o Método DDI, os seguintes passos devem ser seguidos:

#### Passo 1

Definir os parâmetros que caracterizam a linha e o ambiente à sua volta, no que tange a altura  $h$  da linha, a resistividade do solo  $\rho$ , a densidade de descargas para o solo  $N_g$  e possíveis níveis de isolamento da linha.

## Passo 2

Selecionar observações aleatórias do valor de pico  $I_p$  da corrente de retorno da descarga atmosférica e da distância  $y$  da descarga à linha .

## Passo 3

Definir, a partir da aplicação do modelo eletrogeométrico, se cada descarga gerada aleatoriamente é uma descarga direta ou indireta.

## Passo 4

Calcular o valor de pico da tensão induzida pelas descargas atmosféricas indiretas.

## Passo 5

Verificar se a condição para disrupção foi alcançada. Em caso afirmativo, contabilizar o número de disrupções para cada nível de isolamento considerado. Considera-se que ocorreu uma disrupção quando o valor de pico da tensão induzida ultrapassou o valor de  $1,5 \times (CFO)$ , conforme adotado no Guia IEEE Std 1410:2004 [2]. O termo *CFO* é uma acrônimo em Inglês para “Critical Impulse Flashover Voltage” e representa o valor de pico de uma onda impulsiva que, sob certas condições, irá causar uma disrupção em 50% das vezes.

## Passo 6

Ao chegar no número máximo de eventos a serem simulados, calcular a taxa de disrupções por 100 *km por ano*.

A Figura 2.1 mostra um fluxograma do método proposto.

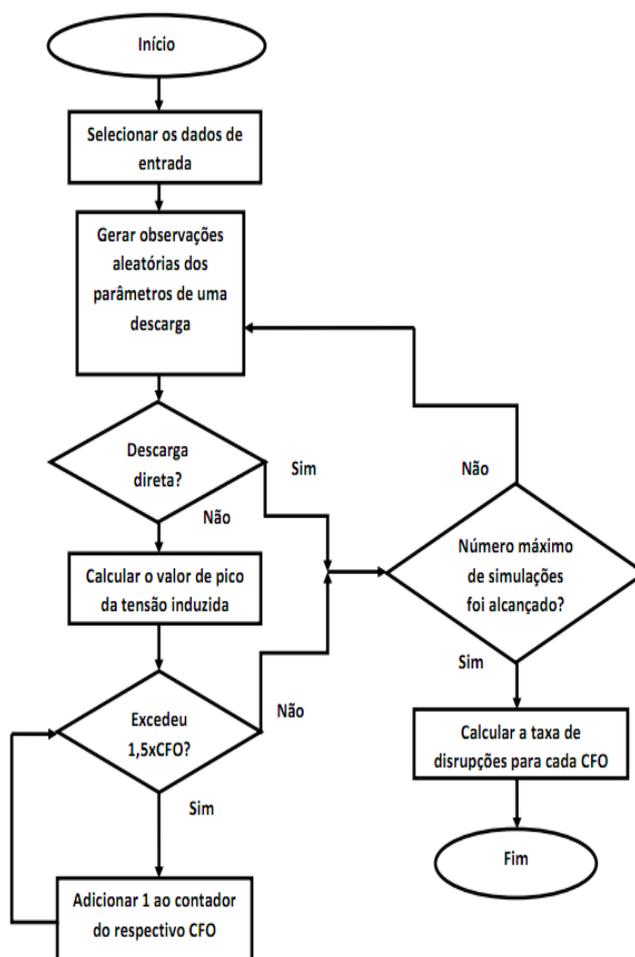


Figura 2.1: Fluxograma simplificado do Método DDI.

## 2.2 Geração de observações aleatórias dos parâmetros das descargas atmosféricas

A simulação de Monte Carlo baseia-se em amostragem de distribuições de variáveis aleatórias. Uma descarga atmosférica é aleatória por natureza, seus parâmetros são expressos em termos probabilísticos através de dados obtidos em campo [24]. No cálculo probabilístico desenvolvido neste capítulo, são considerados a corrente de pico e o ponto de incidência da descarga para a obtenção de amostras aleatórias.

A Transformada Inversa é uma técnica usada para gerar observações randômicas de uma função distribuição de probabilidade quando essa função possui inversa [26].

Considere  $X$  uma variável aleatória distribuída de acordo com a função  $P(X)$ , e  $F(X) = P(X \leq x)$  uma função de distribuição acumulada. Para gerar observações aleatórias de  $P(X)$  basta [26]:

1. Gerar distribuição aleatória  $r$  uniformemente distribuída entre 0 e 1;
2. Fazer  $F(X) = r$  e resolver para  $x$ ,  $x$  será a observação aleatória desejada.

A Figura 2.2 ilustra o método.

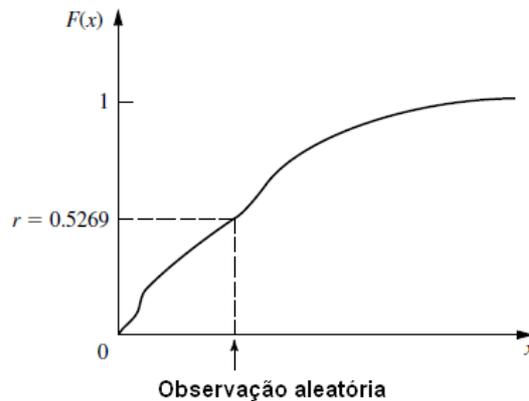


Figura 2.2: Ilustração do método da Transformada Inversa [26].

No método proposto neste trabalho, da mesma forma que no Guia IEEE Std 1410:2004, para o cálculo dos valores de pico da tensão induzida, a velocidade relativa da corrente de retorno é considerada como 0,4. Além disso, considera-se que a forma de onda da corrente de retorno é um degrau.

### 2.2.1 Distribuição das correntes de pico das descargas atmosféricas

Os parâmetros de uma descarga atmosférica podem ter sua variação estatística aproximada por uma função lognormal[24], onde a função densidade de probabilidade  $p(x)$  é

dada pela Equação 2.1.:

$$p(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln x}} \exp \left[ -0,5 \left( \frac{\ln x - \ln x_m}{\sigma_{\ln x}} \right)^2 \right], \quad (2.1)$$

sendo  $x$  a variável aleatória,  $\sigma_{\ln x}$  o desvio padrão de  $\ln x$  e  $x_m$  o valor médio de  $x$ .

Uma equação mais simples que a Equação 2.1 que pode representar a distribuição estatística para os valores de pico da corrente de retorno é a Equação 2.2:

$$P_c(> I_p) = \frac{1}{1 + \left( \frac{I_p}{I_{pm}} \right)^\xi}, \quad (2.2)$$

onde:

$I_p$  pico da corrente de retorno da descarga (kA);

$I_{pm}$  valor médio dos valores de pico da corrente de retorno da descarga (kA);

$\xi$  constante que caracteriza o tipo de distribuição estatística para os valores de pico de corrente de retorno;

$P_c$  probabilidade do valor de pico da corrente de retorno exceder  $I_p$  em (kA).

Com o fim de se produzir observações aleatórias da distribuição estatística dos valores de pico da corrente de retorno de uma descarga, o método da Transformada Inversa é utilizado. Toma-se a distribuição acumulada das correntes de pico de descarga como  $P_d(\leq I_o)$ :

$$P_d(\leq I_p) = 1 - P_c(> I_p), \quad (2.3)$$

sendo:

$P_d$  probabilidade do pico da corrente de retorno em alguma descarga ser menor ou igual a  $I_p$  em kA.

Daí,

$$P_d(\leq I_p) = \frac{\left( \frac{I_p}{I_{pm}} \right)^\xi}{1 + \left( \frac{I_p}{I_{pm}} \right)^\xi} \quad (2.4)$$

Resolvendo a Equação (2.4) para a corrente de pico da descarga com relação a qualquer valor de probabilidade, tem-se :

$$I_p = I_{pm} \left( \frac{P_d}{1 - P_d} \right)^{1/\xi} \quad (2.5)$$

Fazendo  $P_d$  um número uniformemente distribuído entre 0 e 1 na Equação (2.5), obtêm-se observações aleatórias da curva de distribuição dos valores de pico da corrente de retorno.

### 2.2.2 Ponto de incidência de uma descarga atmosférica

A distância máxima de uma descarga à linha  $y_{max}$  é tomada como a maior distância que uma descarga pode atingir e que ainda assim provoque uma disrupção na linha. A distância  $y_{max}$  é encontrada através da expressão utilizada para calcular o valor de pico da tensão induzida a ser considerada neste trabalho, que será apresentada mais adiante.

Para determinação do ponto de incidência de uma descarga, será considerado um sistema de coordenadas como mostrado na Figura 2.3. Onde  $y_{min}$  é a distância mínima a partir da qual a descarga incide direto na linha.

As observações aleatórias para o ponto de incidência da descarga são obtidas considerando-se um conjunto de observações uniformemente distribuídas na área de incidência de descargas  $A_{inc} = 2 \times y_{max} \times L$ . As coordenadas do ponto de incidência da descarga são obtidas conforme as seguinte equações:

$$y = NA \times 2y_{max} \quad (2.6)$$

$$x = NA \times L \quad (2.7)$$

Onde NA é um número aleatório uniformemente distribuído no intervalo de 0 a 1.

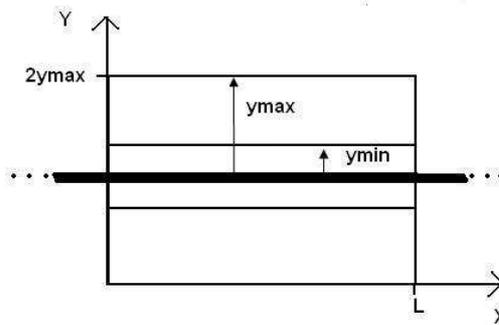


Figura 2.3: Faixa de incidência das descargas geradas nas simulações.

A descarga pode ser classificada como direta ou indireta, dependendo de sua região de incidência. A próxima seção elucidada como essa classificação acontece.

## 2.3 O modelo eletrogeométrico, discriminação entre as descargas diretas e indiretas

O modelo eletrogeométrico (EGM) é usado para estabelecer a menor distância em que uma descarga não irá atingir uma linha, mas sim o solo ou outra estrutura próxima à linha. O raio de atração da linha e raio de atração das estruturas ou do solo são calculadas por (2.8) e (2.9) respectivamente. Os valores  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $k$  caracterizam o modelo eletrogeométrico. A Tabela 2.1 apresenta três modelos eletrogeométricos propostos na literatura.

A Equação (2.10) determina a menor distância em que uma descarga não irá atingir uma linha. A Figura 2.4 ilustra as distâncias de atração para o condutor e para o solo.

$$r_s = \alpha \times I_p^\beta \quad (2.8)$$

$$r_g = k \times r_s \quad (2.9)$$

$$y_{min} = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} \quad (2.10)$$

$r_s$  raio de atração da linha (m);

$r_g$  raio de atração das estruturas ou do solo (m);

$I_p$  pico da corrente de retorno (kA);

$h$  altura da linha (m);

$y_{min}$  menor distância em que uma descarga não atingirá uma linha (m).

Tabela 2.1: Parâmetros dos Modelos Eletrogeométricos

| Modelos Eletrogeométricos | $\alpha$ | $\beta$ | k   |
|---------------------------|----------|---------|-----|
| EGM IEEE Std 1410:2004    | 10       | 0,65    | 0,9 |
| EGM Love                  | 10       | 0,65    | 0,8 |
| EGM Whitehead-Armstrong   | 6,7      | 0,8     | 0,9 |

Com a geração aleatória do ponto de incidência da descarga e da corrente de retorno, o método proposto neste trabalho avalia se a descarga foi direta ou se foi indireta. Esta decisão é tomada baseando-se na menor distância em que uma descarga não atingirá uma linha  $y_{min}$ , se a distância da descarga à linha for menor  $y_{min}$  uma descarga direta acontece, caso contrário é considerado que ocorreu uma descarga indireta.

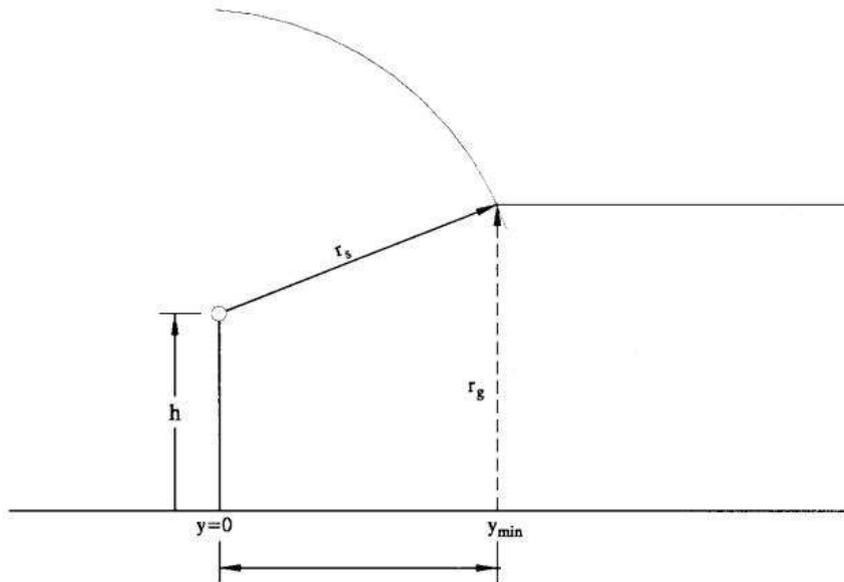


Figura 2.4: Ilustração das distâncias de atração do modelo eletrogeométrico, adaptado de [2].

## 2.4 O cálculo do valor de pico da tensão induzida por uma descarga considerando a resistividade do solo

Recentemente, Paulino *et al* [12] apresentou uma fórmula para estimar o valor de pico de uma tensão induzida por uma descarga atmosférica numa linha infinita, levando-se em consideração a resistividade do solo. A fórmula, reproduzida na Equação 2.11, mostra que o pico da tensão induzida é uma função do pico da corrente de retorno, da velocidade de propagação da corrente de retorno, da resistividade do solo, da distância da descarga à linha e da altura da linha.

$$V_{pico} = k_C(\rho, h) \cdot \{V_{picoSolo} + V_{picoRusck}\}, \quad (2.11)$$

onde

$$V_{picoSolo} = \sqrt{3} \cdot (v_r)^{1/3} \cdot I_p \cdot \sqrt{\frac{\rho}{y}} \quad (2.12)$$

e

$$V_{picoRusck} = \frac{30 \cdot I_p \cdot h}{y} \left[ 1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot v_r \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \cdot v_r^2}} \right]. \quad (2.13)$$

Na Equação 2.11,

$$k_C(\rho, h) = 1, \text{ se } \rho = 0 \text{ ou } h = 0 \quad (2.14a)$$

$$k_C(\rho, h) = 0,85, \text{ se } \rho \neq 0 \text{ ou } h \neq 0 \quad (2.14b)$$

$h$  altura da linha (m);

$I_p$  pico da corrente de retorno (kA);

$\rho$  resistividade do solo ( $\Omega.m$ );

$v_r$  velocidade relativa de propagação da corrente de retorno;

$y$  distância do ponto de incidência da descarga a linha (m).

Parte da fórmula mostrada na Equação 2.11 é a fórmula para cálculo do valor de pico da tensão induzida deduzida por Rusck em [14] considerando-se a corrente de retorno como uma função degrau e o solo ideal, esta parte é reproduzida pela Equação 2.13. A outra parte da fórmula é uma expressão deduzida por Paulino *et al* em [12] que leva em conta os efeitos do solo não ideal, reproduzida na Equação 2.12 . Esta expressão foi deduzida considerando que a corrente de retorno da descarga possui uma forma trapezoidal com tempo de frente de  $1 \mu s$ . O fator  $k_C(\rho, h)$  foi adotado por causa do atraso entre os valores de pico de tensão induzida dados pelas Equações 2.12 e 2.13.

Para a se realizar a análise qualitativa proposta neste trabalho, considera-se que a fórmula aproximada para o cálculo do valor de pico da tensão induzida proposta por Paulino *et al* em [12] vale para valores de distância de descarga a linha maiores que 1 km, bem como para valores de velocidade da corrente de retorno no intervalo  $0,1 \leq v_r \leq 0,6$ . Além disso, despreza-se os efeitos de atenuação do solo sobre as ondas eletromagnéticas quando elas se propagam no solo.

## 2.5 O cálculo do número de disrupções por 100 km por ano

Para o cálculo do número de disrupções por 100 km por ano, o método proposto neste trabalho considera uma linha infinitamente longa, considera também que as descargas atingem uma faixa retangular delimitada por  $L$  e  $2 \times y_{max}$  em torno da linha, como mostrado na Figura 2.3, cuja área  $A_{inc} = 2 \times y_{max} \times L$  .

O número de disrupções por 100 km por ano é calculado fazendo  $L = 100 \text{ km}$  e considerando uma densidade de descargas  $N_g \text{ descargas}/\text{km}^2/\text{ano}$ . Como as descargas incidem numa faixa delimitada por  $L \times 2 \times y_{max}$ , o número total de descargas  $N_{tot}$  a ser simulado é de  $L \times N_g \times 2 \times y_{max} \times T$ , onde  $T$  é expresso em anos.

O método DDI, realiza uma simulação de  $N_{tot}$  eventos, onde é contabilizado o número  $N$  de eventos em que se deu uma disrupção, depois divide-se esse valor  $N$  pelo número de anos simulado, e obtém-se o valor de disrupções por  $100km$  por ano. Então, tem-se  $F_p$  - número de disrupções por  $100km$  por ano - calculado por

$$F_p = \frac{N}{T} \quad (2.15)$$

As formulações apresentadas neste capítulo balizam as simulações computacionais feitas neste trabalho para determinação do desempenho de linhas de distribuição de energia elétrica frente a descargas atmosféricas. As variáveis aleatórias consideradas no método de Monte Carlo são o valor de pico da corrente de retorno  $I_p$  e a distância da descarga a linha  $y$ . O valor de pico da tensão induzida será dado pela fórmula de Paulino *et al* em [12], o critério de disrupção é o mesmo adotado em [2] e o cálculo do número de disrupções é dado pela média anual desses eventos. No capítulo seguinte, é discutida a validação do método proposto neste capítulo.

# Capítulo 3

## Validação do Método DDI

Neste capítulo, testa-se as massas de dados utilizadas nas simulações do Método DDI para verificação de sua validade. Adicionalmente, compara-se os resultados obtidos pelo Método DDI com outros resultados apresentados na literatura.

### 3.1 Condições de simulação

Com o Método DDI, foram desenvolvidos códigos no *MATLAB*<sup>®</sup> para a obtenção do desempenho de uma linha de distribuição frente a descargas indiretas.

As premissas básicas usadas no Método DDI para as simulações foram: linha infinitamente longa e disposta num campo aberto e sem cabo-guarda; a altura da linha  $h = 10\text{ m}$ ; a densidade de descargas  $N_g = 1\text{ descarga}/\text{km}^2/\text{ano}$  e o modelo eletrogeométrico é o mesmo utilizado no Guia IEEE Std 1410:2004 [2].

### 3.2 Número de eventos a ser utilizado nas simulações

Nesta seção, determina-se o número mínimo de eventos que é considerado nas simulações feitas neste trabalho.

Se determinada atenção for dada à Equação 3.1 que é usada para cálculo de número de desligamentos por 100 *km* por ano

$$F_p = \frac{N}{T}, \quad (3.1)$$

pode-se perceber que

$$F_p = \frac{N}{T} = \left( \frac{N}{N_{tot}} \right) (L \times 2 \times y_{max} \times N_g) \quad (3.2)$$

Agora, se for definido que “falha” é quando uma descarga causa uma interrupção, e “sucesso” quando contrário, tem-se então uma variável aleatória Binomial. De onde pode-

se estimar a proporção de descargas que causam desligamento através de

$$\hat{p} = \frac{N}{N_{tot}} \quad (3.3)$$

onde  $N$  é o número de descargas que causaram interrupção e  $N_{tot}$  é o número total de amostras.

Um erro  $E$  para um estimador  $\hat{p}$  como o dado na Equação 3.3, pode ser conseguido numa amostra de tamanho dado por [29]:

$$N_{tot} = \left( \frac{z_{\frac{\alpha}{2}}}{E} \right)^2 \times 0,25 \quad (3.4)$$

Em outras palavras, tem-se no mínimo  $100(1 - \alpha)\%$  de confiança de que o erro em se estimar  $p$  por meios de  $\hat{p}$ , é menor do que  $E$ , se o número de amostras a ser analisado for obtido pela Equação 3.4, onde  $p$  é a proporção real de descargas que causam desligamentos.

Definindo-se  $E = 0,001$  e um intervalo de confiança de 95%, através da Equação 3.4, tem-se,

$$N_{tot} = \left( \frac{1,96}{0,001} \right)^2 \times 0,25$$

$$N_{tot} = 960400$$

Assim, o número de descargas que será utilizado em cada simulação será de 960400 descargas.

### 3.3 Gerador de números aleatórios

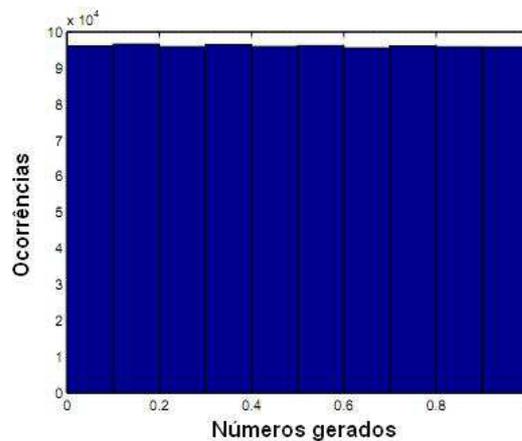


Figura 3.1: Histograma de valores aleatórios entre 0 e 1 gerados pela função *rand* do *MATLAB*<sup>®</sup>.

O gerador de números aleatórios usado neste trabalho é a função *rand* fornecida no programa *MATLAB*<sup>®</sup>. Esta função retorna um vetor contendo números pseudo aleatórios

uniformemente distribuídos num intervalo de 0 a 1. A Figura 3.1 apresenta o histograma de um conjunto de 960400 números gerados aleatoriamente pela função *rand*. Como pode ser observado, a quantidade de eventos gerados leva a uma representação uniforme dos dados.

### 3.4 Geração dos dados para corrente de retorno

Nesta seção, são apresentadas as curvas de distribuição estatística para os valores de pico da corrente de retorno. Além disso, testes com as massas de dados geradas são feitos para se verificar a qualidade na geração das observações aleatórias utilizadas nas simulações.

#### 3.4.1 As curvas de distribuição estatística para os valores de pico da corrente de retorno

No Método DDI, é considerada como curva padrão de distribuição estatística da corrente de retorno a curva de Anderson-Erikson [28]. Tal curva foi obtida através da coleta de 338 descargas descendentes ao redor do mundo em estruturas com altura máxima de 60 m, a restrição da altura é para evitar o acontecimento de descargas ascendentes.

O Método DDI tem como base a equação simplificada para representação da distribuição estatística da corrente de retorno:

$$P_c(> I_p) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_p}{31}\right)^{2,6}} \quad (3.5)$$

A Equação 3.5 é válida para  $I_p$  menor ou igual 200 kA [2]. Na próxima seção, testes são feitos com o conjunto de valores de pico da corrente de retorno gerados para as simulações para verificar sua validade.

#### 3.4.2 Testes com o conjunto de observações aleatórias geradas para a corrente de retorno

Para investigar a qualidade da geração de observações aleatórias de valores de pico da corrente de retorno, é simulado um conjunto com  $N_{tot} = 960400$  de descargas. Deste conjunto gerado, os valores de pico da corrente de retorno maiores que 200 kA foram substituídos por outro valor de pico de corrente gerado aleatoriamente através da aplicação da transformada inversa.

A Figura 3.2 apresenta uma comparação entre a distribuição de probabilidade acumulada esperada e obtida para os valores de pico da corrente de retorno. Os valores esperados foram calculados através da Equação 3.6, esta equação retorna o valor de probabilidade

para que alguma descarga atmosférica possua um valor de pico de corrente de retorno menor ou igual a um valor de pico de corrente de retorno especificado.

$$P_d(\leq I_p) = \frac{\left(\frac{I_p}{31}\right)^{2,6}}{1 + \left(\frac{I_p}{31}\right)^{2,6}} \quad (3.6)$$

Para a obtenção da probabilidade acumulada dos valores de pico de corrente de retorno gerados, contabilizou-se quantas vezes foram gerados valores de pico de corrente de retorno menor ou igual a um valor de referência e dividiu-se essa frequência de aparição pelo total de dados gerados. A Tabela 3.1 detalha os valores apresentados na Figura 3.2. Como esperado, cerca de 50% dos valores de pico de corrente de retorno que foram gerados estão abaixo ou são iguais a 31 kA.

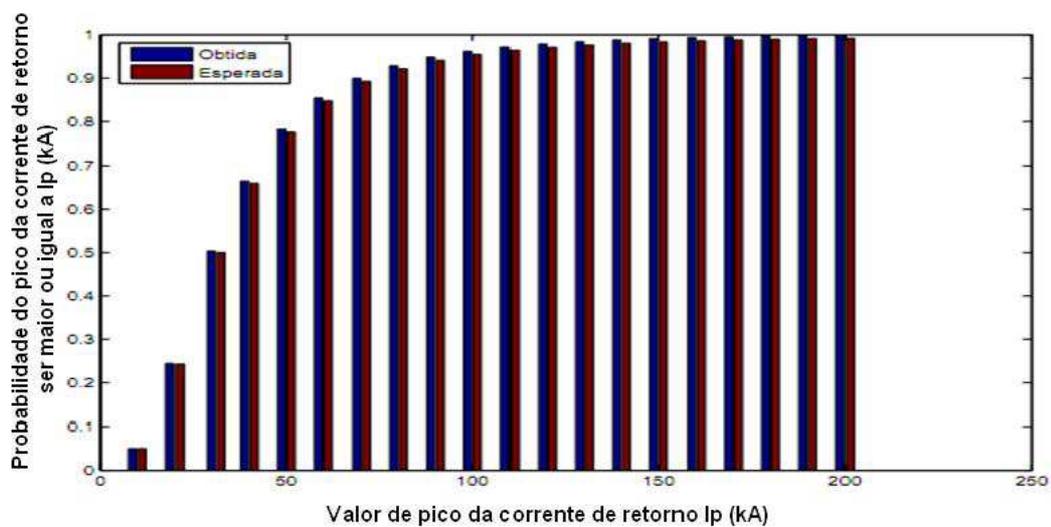


Figura 3.2: Comparação entre a distribuição de probabilidade acumulada esperada e obtida para os valores de pico da corrente de retorno.

Tabela 3.1: Comparação entre os valores esperados e obtidos para a probabilidade de um valor de pico da corrente de retorno ser menor ou igual a um valor de  $I_p$  para a curva de distribuição de Anderson-Erikson

|          |        |        |        |        |        |        |        |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ip (kA)  | 10     | 20     | 31     | 40     | 50     | 60     | 70     |
| Esperada | 0,0501 | 0,2424 | 0,5    | 0,6599 | 0,7761 | 0,8477 | 0,8926 |
| Obtida   | 0,05   | 0,244  | 0,5038 | 0,6652 | 0,7821 | 0,8541 | 0,8993 |
| Ip (kA)  | 80     | 90     | 100    | 110    | 120    | 130    | 140    |
| Esperada | 0,9216 | 0,9411 | 0,9546 | 0,9642 | 0,9712 | 0,9765 | 0,9805 |
| Obtida   | 0,9287 | 0,9483 | 0,9619 | 0,9716 | 0,9787 | 0,984  | 0,9881 |
| Ip (kA)  | 150    | 160    | 170    | 180    | 190    | 200    | -      |
| Esperada | 0,9837 | 0,9862 | 0,9882 | 0,9898 | 0,9911 | 0,9922 | -      |
| Obtida   | 0,9912 | 0,9937 | 0,9957 | 0,9974 | 0,9988 | 1      | -      |

### 3.5 Comparação com outros resultados apresentados na literatura

Nesta seção, fazem-se comparações entre os resultados obtidos pelo Método DDI e outros resultados obtidos por outros autores.

A Figura 3.3 mostra a comparação entre os resultados obtidos pelo Método DDI e os apresentados no Guia IEEE Std 1410:2004 para condição de solo com resistividade nula. Observa-se que os resultados são praticamente iguais.

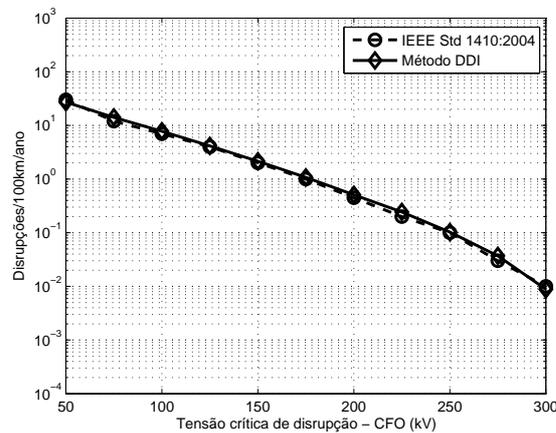


Figura 3.3: Comparação do Método DDI com os resultados obtidos no Guia IEEE Std 1410:2004,  $\rho = 0 \Omega m$ .

Isso acontece, pois quando o solo é considerado ideal, a fórmula que calcula o valor de pico da tensão induzida usada no Método DDI retorna os mesmos valores que seriam alcançados pela fórmula de Rusck, que é a fórmula utilizada no Guia IEEE Std 1410:2004. Sem contar que, a condição para o acontecimento de uma disrupção e o modelo eletro-

geométrico são os mesmos que no Guia IEEE Std 1410:2004. Além disso, considerou-se  $vr = 0,4$ , como no Guia.

O Método DDI tem como ponto forte a sua simplicidade. Esta simplicidade é conquistada com o uso da formulação de Paulino *et al* em [12], já que permite avaliar a influência do valor de pico da corrente de retorno, da velocidade relativa da corrente de retorno, da resistividade do solo, da altura da linha e da distância da descarga à linha com pouco custo computacional. No próximo capítulo, são apresentados os principais resultados e discussões adquiridos com o Método DDI.

# Capítulo 4

## Resultados e discussões

Este capítulo apresenta os principais resultados obtidos usando o Método DDI. Os resultados das simulações são separados nos seguintes blocos:

- Investigação da influência do modelo eletrogeométrico na determinação do desempenho de uma linha de distribuição;
- Investigando a utilização dos modelos usados para representar a velocidade da corrente de retorno de uma descarga atmosférica;
- Comparação do Método DDI com o procedimento do guia IEEE Std 1410:2004 adaptado de modo a considerar a influência da resistividade do solo no cálculo do valor de pico da tensão induzida.

### 4.1 Investigação da influência do modelo eletrogeométrico na determinação do desempenho de uma linha de distribuição

Nesta seção, investiga-se a influência da escolha do modelo eletrogeométrico (EGM) na determinação do desempenho de uma linha de distribuição frente a descargas indiretas. Também verifica-se a influência do modelo eletrogeométrico adotado no número de desligamentos à medida que a resistividade do solo varia. São utilizados, nesse estudo, três modelos eletrogeométricos, a saber o modelo utilizado no Guia IEEE Std 1410:2004, o modelo proposto por Love *apud* [28] e o modelo proposto por Whitehead e Armstrong em [27]. Estes modelos são caracterizados pelos valores mostrados na Tabela 4.1 e pelas Equações 4.1, 4.2 e 4.3, já apresentadas no Capítulo 2 e repetidas aqui apenas para dar comodidade ao leitor.

$$r_s = \alpha \times I_p^\beta \quad (4.1)$$

Tabela 4.1: Parâmetros dos Modelos Eletrogeométricos

| Modelos Eletrogeométricos | $\alpha$ | $\beta$ | k   |
|---------------------------|----------|---------|-----|
| EGM IEEE Std 1410:2004    | 10       | 0,65    | 0,9 |
| EGM Love                  | 10       | 0,65    | 0,8 |
| EGM Whitehead-Armstrong   | 6,7      | 0,8     | 0,9 |

$$r_g = k \times r_s \quad (4.2)$$

$$y_{min} = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} \quad (4.3)$$

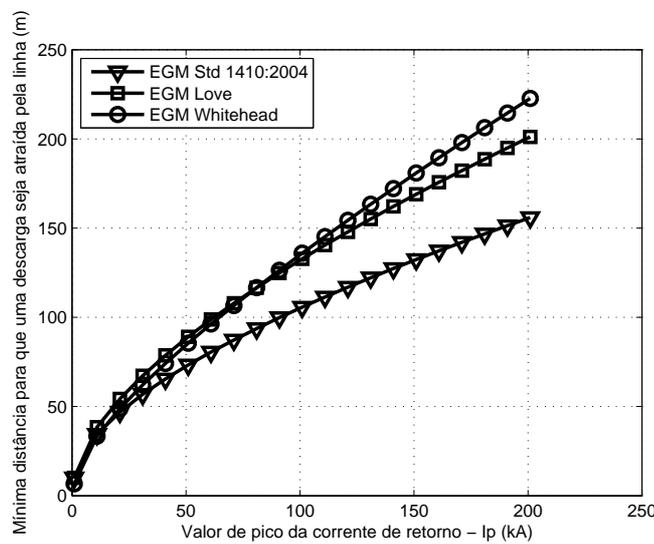


Figura 4.1: Comparação entre as distâncias mínimas de atração obtidas pelos EGMs estudados neste trabalho em função do valor de pico da corrente de retorno.

A Figura 4.1 mostra a comparação entre as distâncias mínimas para as quais uma descarga atingiria uma linha diretamente em função do valor de pico da corrente de retorno. As curvas na Figura 4.1 foram obtidas através de uma combinação das Equações 4.1, 4.2 e 4.3 para cada modelo eletrogeométrico. Nota-se que dos três modelos analisados, o modelo utilizado no Guia IEEE Std 1410:2004 é o que apresenta os menores valores de distância mínima de atração.

A Figura 4.2 apresenta os resultados obtidos pelo Método DDI usando os três modelos eletrogeométricos estudados neste trabalho para os valores de resistividade do solo de  $0 \Omega m$  a  $1000 \Omega m$ . Como pode ser visto, à medida em que a resistividade do solo aumenta o número de disrupções devido a descargas indiretas aumenta. Além disso, para baixos valores de resistividade, números diferentes de disrupções são obtidos por cada modelo eletrogeométrico para valores altos de nível de isolamento da linha. Já para altos valores

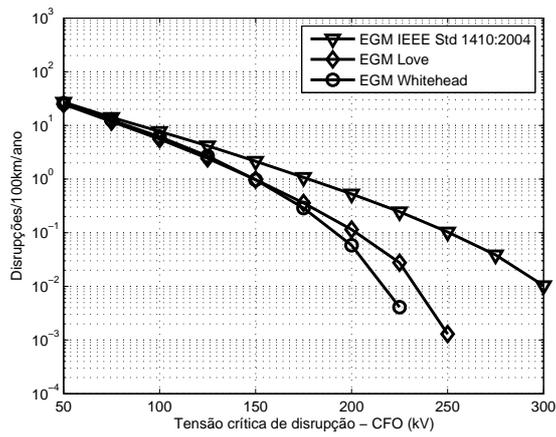
de resistividade do solo, o número de disrupções obtidos através do uso dos três modelos ficaram mais próximos. Logo, há indícios de que, para altos valores de resistividade do solo, a influência do solo sobre número de disrupções obtidas pelo Método DDI vai se sobrepondo à influência do tipo de modelo eletrogeométrico utilizado.

A Tabela 4.2 mostra a discriminação da quantidade de descargas diretas e indiretas feita por cada modelo eletrogeométrico dentro do conjunto de 960400 eventos de descarga atmosféricas simulados, considerando a altura da linha  $h = 10 \text{ m}$  e  $N_g = 1 \text{ descarga/km}^2/\text{ano}$ . Esta tabela também informa o número de anos simulados para cada valor de resistividade do solo e a distância máxima de uma descarga à linha  $y_{max}$ .

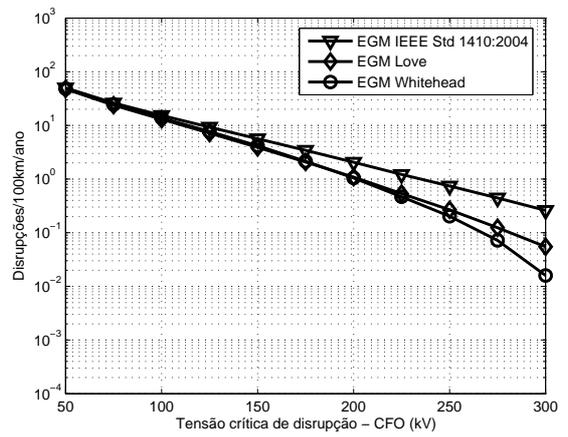
Percebe-se que, com o aumento da resistividade do solo, o valor de  $y_{max}$  aumenta. Como a resistividade do solo tem o efeito de aumentar o valor de pico da tensão induzida, a distância da descarga à linha que pode provocar uma disrupção no menor nível de isolamento considerado aumenta.

Nota-se também, na Tabela 4.2, que o número de descargas indiretas aumenta com o aumento da resistividade. Isto acontece, pois o aumento da resistividade implica um aumento na distância máxima da descarga à linha  $y_{max}$ , com o aumento de  $y_{max}$ , a área de incidência de descargas, definida no Método DDI, também aumenta; como o número de descargas simuladas  $N_{tot}$  é fixo, e essas descargas são distribuídas uniformemente, as chances de uma descarga incidir fora da região de atração para linha aumentam.

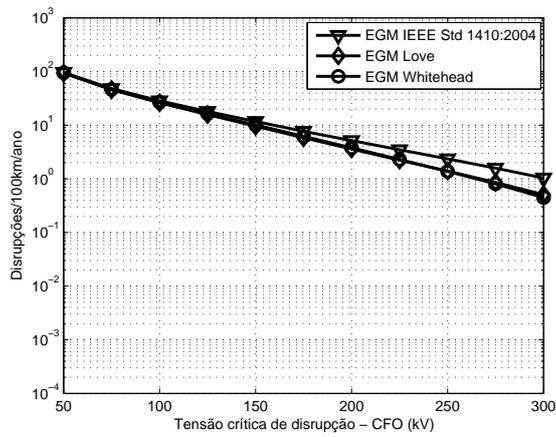
Ainda da Tabela 4.2, vê-se que o número de anos simulados diminui com o aumento da resistividade. Isto acontece, pois a densidade de descargas para terra  $N_g$  e o número total de descargas simuladas  $N_{tot}$  são fixos. Como dito anteriormente, o aumento da resistividade do solo implica um aumento na área de incidência de descargas. Para que o número  $N_g$  permaneça constante diante de um número total de descargas constante, o número de anos simulados é reduzido.



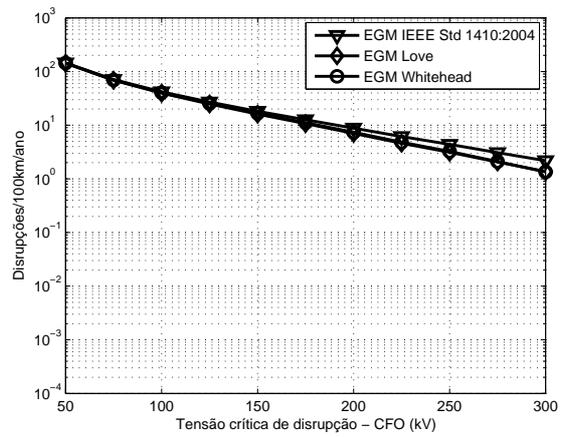
(a)  $\rho = 0 \Omega m.$



(b)  $\rho = 100 \Omega m.$



(c)  $\rho = 500 \Omega m.$



(d)  $\rho = 1000 \Omega m.$

Figura 4.2: Comparação entre os números de disrupções obtidos através dos três modelos eletrogeométricos estudados neste trabalho usando o Método DDI para valores de resistividade do solo variando de 0 a 1000  $\Omega m.$

Tabela 4.2: Descargas diretas e indiretas por EGM

| Resistividade do solo - $\rho = 0 \Omega m$ - 960400 descargas    |         |           |         |               |
|---|---------|-----------|---------|---------------|
| EGM   | Diretas | Indiretas | Anos    | $y_{max}$ (m) |
| IEEE Std 1410   | 55892   | 904508    | 4635,55 | 1035,9        |
| Love  | 66752   | 893648    | 4635,55 | 1035,9        |
| Whitehead   | 63089   | 897311    | 4635,55 | 1035,9        |
| Resistividade do solo - $\rho = 100 \Omega m$ - 960400 descargas  |         |           |         |               |
| EGM   | Diretas | Indiretas | Anos    | $y_{max}$ (m) |
| IEEE Std 1410   | 25517   | 934883    | 2130,2  | 2253,80       |
| Love  | 30481   | 929919    | 2130,2  | 2253,80       |
| Whitehead   | 28828   | 931572    | 2130,2  | 2253,80       |
| Resistividade do solo - $\rho = 500 \Omega m$ - 960400 descargas  |         |           |         |               |
| EGM   | Diretas | Indiretas | Anos    | $y_{max}$ (m) |
| IEEE Std 1410   | 10196   | 950204    | 826,29  | 5811,45       |
| Love  | 12128   | 948272    | 826,29  | 5811,45       |
| Whitehead   | 11484   | 948916    | 826,29  | 5811,45       |
| Resistividade do solo - $\rho = 1000 \Omega m$ - 960400 descargas |         |           |         |               |
| EGM   | Diretas | Indiretas | Anos    | $y_{max}$ (m) |
| IEEE Std 1410   | 5696    | 954704    | 477,3   | 10051,57      |
| Love  | 6786    | 953614    | 477,3   | 10051,57      |
| Whitehead   | 6406    | 953994    | 477,3   | 10051,57      |

Em suma, o desempenho de uma linha de distribuição frente a descargas indiretas é afetado pela resistividade do solo. O tipo de modelo eletrogeométrico escolhido influencia nos resultados obtidos pelo Método DDI para valores mais baixos de resistividade do solo. Sendo o modelo eletrogeométrico usado no Guia IEEE Std 1410:2004 o que apresentou o desempenho mais pessimista. Na próxima seção, estuda-se a influência da escolha de um modelo para a velocidade da corrente de retorno no desempenho de uma linha de distribuição frente a descargas indiretas.

## 4.2 Investigando da influência dos modelos usados para representar a velocidade da corrente de retorno de uma descarga atmosférica

Nesta seção, são apresentados os resultados da comparação entre duas abordagens para consideração de velocidade da corrente de retorno usando o Método DDI para obtenção do desempenho de uma linha de distribuição frente a descargas atmosféricas considerando a resistividade do solo. As abordagens adotadas para a velocidade da corrente de retorno são:

Abordagem I) A equação que relaciona a velocidade relativa da corrente de retorno com o valor de pico corrente de retorno do seguinte modo [22]:

$$vr = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{500}{I_p}}} \quad (4.4)$$

Abordagem II) A velocidade relativa constante  $vr = 0,4$  como é adotado pelo guia IEEE Std 1410:2004

A Figura 4.3 mostra uma comparação entre as duas abordagens para velocidade relativa da corrente de retorno estudadas nesta seção.

A Figura 4.4 mostra os resultados obtidos pelo Método DDI com as duas abordagens para velocidade relativa da corrente de retorno mencionadas acima. Como pode ser visto, apenas quando o solo é considerado ideal, há uma diferença no número de disrupções obtidos para altos valores de nível de isolamento. Para os outros valores de resistividade do solo, a utilização de uma ou outra abordagem estudada neste trabalho não influi no resultado obtido pelo Método DDI.

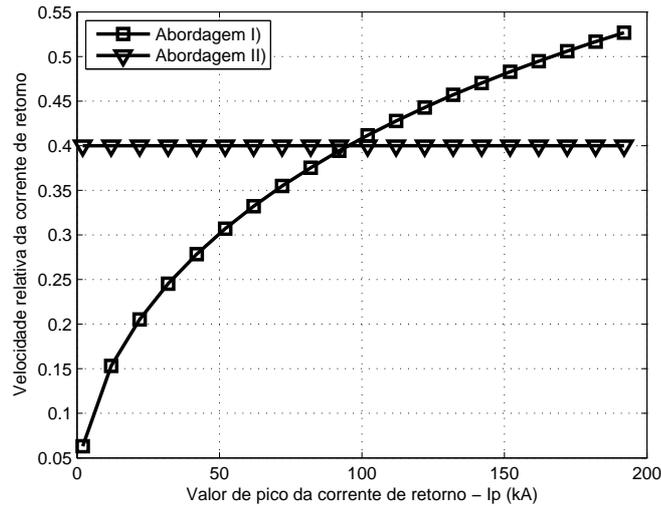
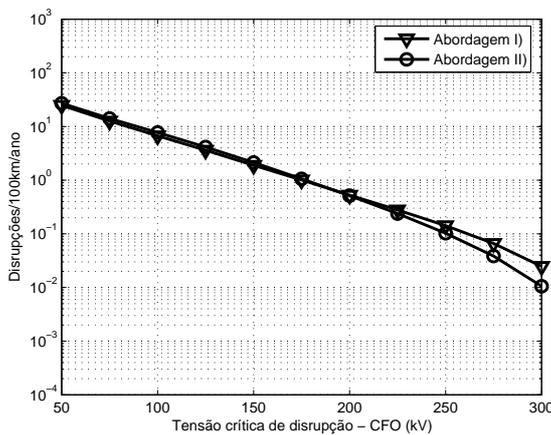
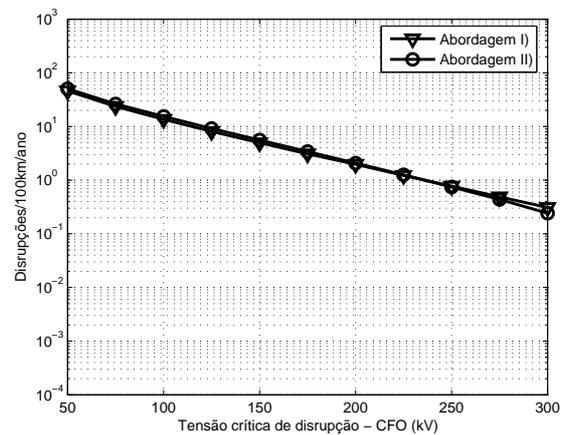


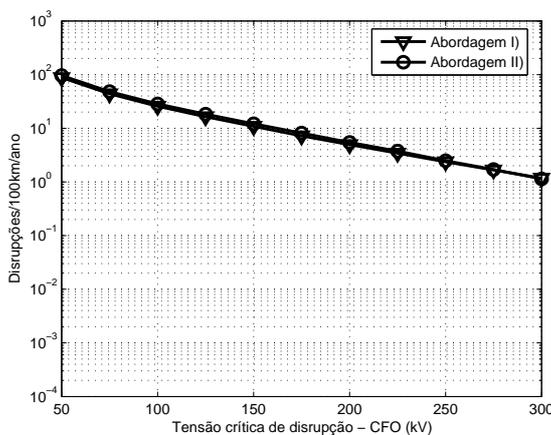
Figura 4.3: Comparação entre as abordagens usadas neste trabalho para velocidade relativa da corrente de retorno em função do valor de pico da corrente de retorno.



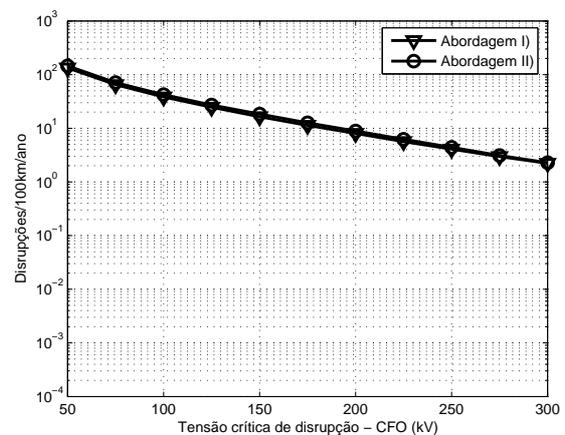
(a)  $\rho = 0 \Omega m$



(b)  $\rho = 100 \Omega m$



(c)  $\rho = 500 \Omega m$



(d)  $\rho = 1000 \Omega m$

Figura 4.4: Comparação entre dois tipos de abordagem para a velocidade da corrente de retorno usando o Método DDI variando a resistividade do solo.

Nesta seção, estudou-se a influência do uso de duas abordagens para velocidade da corrente de retorno na obtenção do número de disrupções pelo Método DDI. Verificou-se que, para valores de resistividade diferentes de zero, o uso de uma ou outra abordagem tem pouca influência nos resultados obtidos pelo Método DDI. Na próxima seção, é feita uma comparação entre o Método DDI e o procedimento do Guia IEEE Std 1410:2004 adaptado de modo a considerar a resistividade do solo.

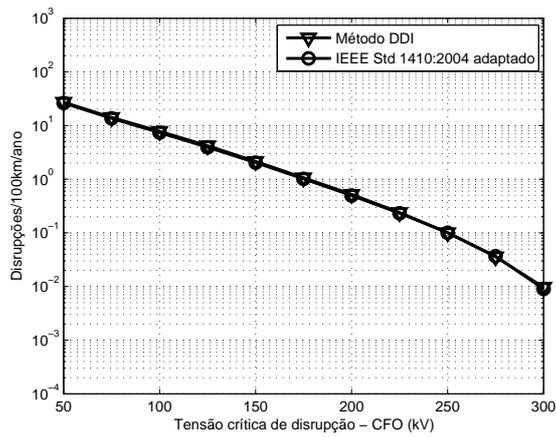
### 4.3 Comparação do Método DDI com o procedimento do guia IEEE Std 1410:2004 em uma forma adaptada

Nesta seção, são apresentados alguns resultados da comparação entre o Método DDI e o procedimento do Guia IEEE Std 1410:2004 adaptado para considerar valores de resistividade do solo no cálculo do valor de pico da tensão induzida. A adaptação do procedimento do Guia IEEE Std 1410:2004 acontece substituindo a fórmula de Rusck pela fórmula de Paulino *et al* em [12]. Assim o procedimento do Guia IEEE Std 1410:2004 pode levar em conta o valor da resistividade do solo nas suas estimações. O método do Guia IEEE Std 1410:2004 é descrito no apêndice A.

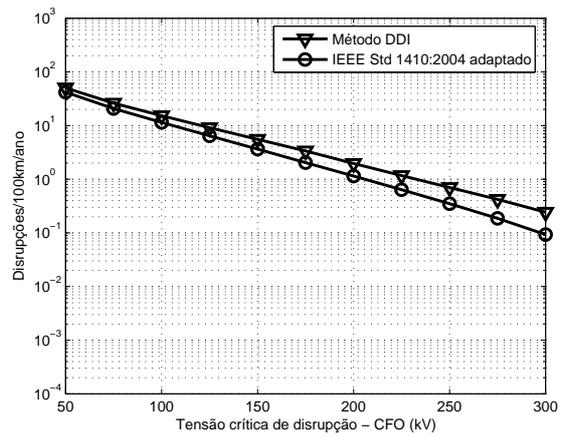
A Figura 4.5 mostra a comparação do desempenho de uma linha de distribuição frente a descargas indiretas obtido pelo Método DDI e pelo procedimento do Guia IEEE Std 1410:2004 adaptado para vários valores de resistividade do solo.

Os dois métodos têm em comum a fórmula que descreve a distribuição estatística da corrente de retorno, modelo eletrogeométrico, a fórmula para o cálculo de pico da tensão induzida, o valor de velocidade relativa da corrente de retorno e a condição de ocorrência de disrupção. A principal diferença entre os dois métodos é abordagem estatística utilizada, enquanto o Método DDI usa o método de Monte Carlo, o procedimento do Guia IEEE Std 1410:2004 utiliza-se dos procedimentos descritos em [31] e [5] *apud* [2].

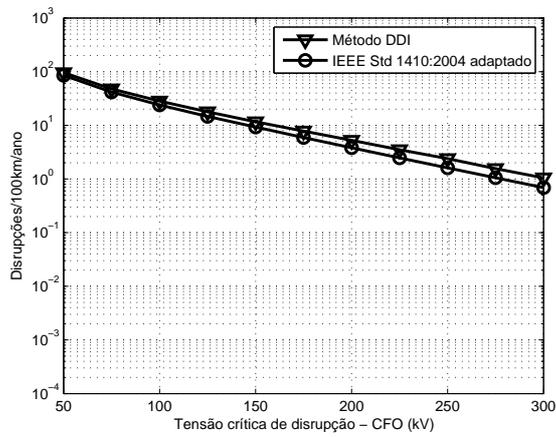
Quando o solo é ideal os dois métodos assumem os mesmos resultados. Quando a resistividade do solo é diferente de zero, à medida em que a resistividade aumenta a diferença entre os resultados obtidos pelos dois métodos diminui.



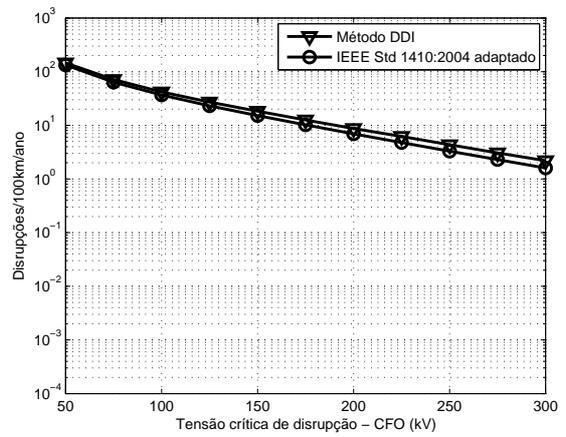
(a)  $\rho = 0 \Omega m$



(b)  $\rho = 100 \Omega m$



(c)  $\rho = 500 \Omega m$



(d)  $\rho = 1000 \Omega m$

Figura 4.5: Comparação entre o Método DDI e o método do guia IEEE Std 1410:2004 em sua forma adaptada variando a resistividade do solo.

Neste capítulo foram apresentados os principais resultados desse trabalho. Foram considerados vários modelos utilizados na literatura e investigou-se sua influência na obtenção do desempenho de uma linha de distribuição frente a descargas atmosféricas indiretas considerando-se a variação da resistividade do solo. No próximo capítulo, tem-se as considerações finais desse trabalho.

## Capítulo 5

# Conclusão e propostas de continuidade

A investigação dos modelos que influenciam na estimação do desempenho de uma linha de distribuição de energia elétrica é muito importante para engenheiros projetistas dessas linhas, já que, dessa forma, pode-se enquadrar linhas em situações mais próximas da realidade. Após a proposição de um método de estimação de desempenho de uma linha de distribuição frente a descargas atmosféricas indiretas e capaz de considerar a resistividade do solo, selecionou-se alguns modelos utilizados amplamente na literatura para investigar a sua influência no cálculo de desempenho da linha.

O desempenho de uma linha de distribuição frente a descargas indiretas é afetado pela resistividade do solo. Sendo que quanto maior a resistividade do solo, maior é o número de desligamentos esperados para uma linha de distribuição.

Nos resultados apresentados neste trabalho, observou-se que, o modelo eletrogeométrico exerce influência no desempenho estimado. Sendo o modelo eletrogeométrico usado no Guia IEEE Std 1410:2004 o que apresentou o desempenho mais pessimista. Além do mais, há indícios de que influência do modelo eletrogeométrico escolhido é tão maior quanto menor a resistividade do solo. De outro lado, para maiores resistividades do solo, os resultados obtidos pelo Método DDI usando os três modelos eletrogeométricos se aproximaram.

Duas diferentes abordagens foram utilizadas para velocidade da corrente de retorno, os resultados indicam que a influência delas sobre os resultados obtidos no cálculo de desempenho de uma linha de distribuição frente a descargas indiretas é pequena.

Além disso, constatou-se que a abordagem estatística utilizada no Método DDI e no procedimento do Guia IEEE Std 1410:2004 adaptado tem influência sobre os resultados obtidos quando a resistividade do solo é diferente de zero. Adicionalmente, observou-se que à medida em que o valor da resistividade aumenta a diferença entre os resultados obtidos pelos dois métodos diminui.

Em resumo, a análise de sensibilidade conduzida neste trabalho apontam para o fato de

que tanto os métodos quanto os modelos investigados proporcionam resultados parecidos quando se considera altos valores de resistividade.

## 5.1 Propostas de continuidade

Como proposta de continuidade deste trabalho sugere-se a implementação de uma formulação para cálculo de tensões induzidas que leve em conta tanto a resistividade do solo quanto o tempo de frente da forma de onda da corrente de retorno. Deste modo, pode-se empregar o método de Monte Carlo utilizando-se como variáveis aleatórias o valor de pico da corrente de retorno, a distância da descarga à linha e o tempo de frente.

Maiores investigações sobre a relação entre a velocidade da corrente de retorno e o valor de pico da corrente, já que, até então, essas grandezas não foram medidas simultaneamente. Na medida em que as pesquisas forem se consolidando, e uma fórmula para representar a distribuição estatística da velocidade da corrente de retorno seja desenvolvida, valerá a pena incorporá-la ao método de Monte Carlo como mais uma variável aleatória a ser avaliada.

Por fim, cabe realizar investigações de desempenho em situações de linhas finitas e com multicondutores sobre um solo imperfeito.

# Apêndice A

## Método do Guia IEEE Std 1410:2004

O Guia IEEE Std 1410 teve sua primeira versão lançada em 1997. Seu principal objetivo era auxiliar os projetistas de isolamento de linhas de distribuição de energia elétrica a reduzir os danos causados por descargas atmosféricas a essas linhas. À medida que novas pesquisas na área de descargas atmosféricas foram surgindo, novas versões do guia foram lançadas, vide a versão do Guia IEEE Std 1410:2004.

O objetivo deste anexo é apresentar de maneira simplificada o método usado no guia IEEE Std 1410:2004 para o cálculo do desempenho de uma linha de distribuição frente a descargas indiretas.

Para estimar o taxa de disrupções numa linha de distribuição devido a descargas atmosféricas indiretas, o Guia IEEE STD 1410:2004 [2] baseia-se nos seguintes passos:

### Passo 1

Considera-se que o pico da corrente de retorno de uma descarga situa-se na seguinte faixa 1 a 200kA. Esta faixa é dividida em intervalos de 1 kA. A probabilidade  $P_i$  da corrente estar dentro de um intervalo  $i$  é calculada usando a Equação A.1. Esta probabilidade é encontrada através da diferença entre a probabilidade para a corrente ser igual ou maior que o menor limite do intervalo e a probabilidade para a corrente alcançar ou superar o maior limite do intervalo.

$$P_c(> I_p) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_p}{31}\right)^{2,6}} \quad (\text{A.1})$$

### Passo 2

Para cada intervalo  $i$ , duas distâncias são calculadas. Sendo elas: a distância máxima  $y_{max}$  para cada intervalo de pico de corrente em que uma descarga pode produzir uma disrupção no isolamento na linha de distribuição; e  $y_{min}$  que é a distância mínima em que

uma descarga não atingirá uma linha.

O cálculo de  $y_{max}$  é obtido resolvendo a Equação A.2

$$V_{picoRusck} = \frac{Z_0 \cdot I_p \cdot h}{y} \left\{ 1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot v_r \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \cdot v_r^2}} \right\} \quad (A.2)$$

onde:

$$Z_0 \text{ é } \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}};$$

$h$  altura da linha (m);

$I_p$  pico da corrente de retorno (kA);

$v_r$  velocidade relativa de propagação da corrente de retorno;

$y$  distância do ponto de incidência da descarga a linha (m).

O valor de  $Z_0$  is  $30 \Omega$ , e os valores medidos para a velocidade da corrente de retorno variam entre  $0,29 \times 10^8 m/s$  e  $2,4 \times 10^8 m/s$ . Por simplificação adota-se  $1,2 \times 10^8 m/s$  para o valor da velocidade da corrente de retorno, que em termos de velocidade relativa seria 0,4 (para obtenção da velocidade relativa faz-se uma razão entre a velocidade da corrente de retorno e o valor da velocidade da luz,  $3 \times 10^8 m/s$ ).

Resolvendo-se a Equação A.2 para  $y$  e tomando  $I_p$  como sendo o valor mais baixo do intervalo em questão, e tomando  $Vp = 1,5 \times CFO$ , tem-se  $y_{max}$ .

Para o cálculo de  $y_{min}$  toma-se o valor mais alto do intervalo de corrente selecionado e o seguinte modelo eletrogeométrico

$$r_s = 10 \times I_p^{0,65} \quad (A.3)$$

$$r_g = 0,9 \times r_s \quad (A.4)$$

onde

$r_s$  distância de incidência no condutor (m);

$r_g$  distância de incidência no solo (m);

$I_p$  pico da corrente de retorno (kA).

O parâmetro  $y_{min}$  é então determinado por

$$y_{min} = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} \quad (A.5)$$

onde

$h$  altura da linha (m);

$y_{min}$  menor distância em que uma descarga não atingirá uma linha (m).

### Passo 3

Finalmente o número anual de disrupções nos isoladores por  $km$ ,  $F_p$ , de uma linha de distribuição é obtido por:

$$F_p = 2 \times \sum_{i=1}^{200} (y_{i_{max}} - y_{i_{min}}) \times N_g \times P_i \times 0,001 \quad (\text{A.6})$$

onde

$N_g$  densidade de descarga anual ( $km^{-2}ano^{-1}$ ).

# Artigo Publicado

- R.P. Souza, J.O.S. Paulino, I. J. S. Lopes, *Influence of Electrogeometric Model and Statistical Current Distribution in Distribution Lines Indirect Lightning Performance Estimation Considering the Ground Resistivity*, IEEE/PES T&D 2010 Latin América, São Paulo, 8 A 10 de Novembro.

# Referências Bibliográficas

- [1] *Guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines*, IEEE Std. 1410, IEEE Working Group on the Lightning Performance of Distribution Lines, 1997.
- [2] *Guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines*, IEEE Std. 1410, IEEE Working Group on the Lightning Performance of Distribution Lines, 2004.
- [3] C. A. Nucci, F. Rachidi, *Lightning-induced overvoltages*, presented at IEEE Transmission and Distribution Conference, New Orleans, Apr. 14, 1999.
- [4] C. A. Nucci, *A Survey on Cigre and IEEE procedures for the estimation of the lightning performance of overhead transmission and distribution lines*, 2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, April 12 - 16, 2010, Beijing, China.
- [5] *Working group report: calculating the lightning performance of distribution lines*, IEEE transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 3, pp. 1408-1417, Jul. 1990.
- [6] A. Borghetti, C. A. Nucci, M. Paolone, *An improved procedure for the assessment of overhead line indirect lightning performance and its comparison with the IEEE Std. 1410 method*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 1, pp. 684-692, Jan. 2007.
- [7] K. Uehara, G. Ohwa, *Investigation of lightning damages on distribution lines*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-87, no. 4, pp. 1018 - 1025, Apr. 1968.
- [8] V. L. Coelho, A. Raizer, J. O. S. Paulino, *Analysis of the lightning performance of overhead distribution lines*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 3, pp. 1706 - 1712, Jul. 2010.
- [9] A.J. Eriksson, M.F. Stringfellow, D.V. Meal, *Lightning induced over voltages on overhead distribution lines*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101, (4), pp. 960-969.

- [10] M. Darveniza, *A Practical Extension of Rusck's Formula for Maximum Lightning-Induced Voltages That Accounts for Ground Resistivity*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 1, pp. 605-612, Jan. 2007.
- [11] E. Perez, J. Herrera, H. Torres, *Sensitivity analysis of induced voltages on distribution lines*, Paper accepted for presentation at 2003 IEEE Bologna PowerTech Conference, June 23-26, Bologna, Italy
- [12] J. O. S. Paulino, C. F. Barbossa, I. J. S. Lopes, W. C. Boaventura, *An approximate formula for the peak value of lightning-induced voltages in overhead lines*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 2, pp. 843-851, Apr. 2010.
- [13] J.A. Martinez, F. Gonzalez-Molina, P. Chowdhuri, *Calculation of lightning flashover rates of overhead distribution lines, a comparative study*, Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE, vol. 4, pp. 62577 - 2582.
- [14] S. Rusck, *Induced lightning over-voltages on power transmission lines with special reference to the over-voltage protection of low-voltage networks*, Ph.D. dissertation, Royal Inst. Technol., Stockholm, Sweden, 1957.
- [15] M.J. Master, M.A. Uman, *Lightning induced voltages on power lines: theory*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, no. 9, pp. 2502 - 2518, Sep. 1984.
- [16] I. J. S. Lopes, *Estudo do comportamento de um condutor multiterrado frente a tensões induzidas por descargas atmosféricas*, UFMG, 1990, Minas Gerais
- [17] R. P. Starling, *Estudo da aplicação da teoria de Rusck e de modelos probabilísticos ao cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas*, UFMG, 1992, Minas Gerais
- [18] J. G. Anderson, *Monte Carlo computer calculation of transmission line lightning performance*, AIEE Trans., vol. 80, pp. 414-20, Aug. 1961.
- [19] J. O. S. Paulino, *Uma contribuição ao estudo da proteção de redes elétricas contra tensões induzidas por descargas atmosféricas*, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, Brasil, 1994.
- [20] A.F. Avila, I.J.S. Lopes, G.C. Miranda, *The application of the lightning locating system data to analyze lightning performance of rural distribution lines in Minas Gerais state*, Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006, IEEE/PES, p. 1 - 5, 2006.

- [21] J. O. S. Paulino, C. F. Barbosa, I. J. S. Lopes, W.C Boaventura, *The Peak Value of Lightning-Induced Voltages in Overhead Lines Considering the Ground Resistivity and Typical Return Stroke Parameters*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 2, pp. 920-927 Apr. 2011.
- [22] P. Chowdhuri, *Parameters of lightning strokes and their effects on power systems*, in proc. 2001 Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE/PES, vol. 2, p. 1047 - 1051.
- [23] P. Chowdhuri, *Estimation of flashover rates of overhead power distribution lines by lightning strokes to nearby ground*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 3, pp. 1982-1989, Jul. 1989.
- [24] Lightning and Insulator Subcommittee of the T&D Committee, *Parameters of lightning strokes: a review*, Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES, p. 465 - 470.
- [25] I. Sobol, *Iniciação na matemática - O método de Monte Carlo*, Editora MIR Moscou, U.R.S.S, 1983.
- [26] F. S. Hillier, G. J. Lieberman, *Introduction to Operations Research*, 7rd ed. McGraw-Hill Higher Education, New York, 2001.
- [27] H. R. Armstrong, E. R. Whitehead, *Field and analytical studies of transmission line shielding*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 87, pp. 270-281, Jan. 1968.
- [28] J. G. Anderson, *Transmission line reference book 345 kV and above*, 2nd Edition, Electric Power Research Institute, 1982, p.549.
- [29] D.C. Montgomery, G.C. Runger *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*, 4ª edição, LTC, 2007, p. 169.
- [30] A.J., Eriksson *The Incidence of Lightning Strikes to Power Lines*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. PWRD-2, no. 2, pp. 859-870, July 1987.
- [31] F. De la Rosa, *Assessing the Operation of Distribution Lines in a Lightning Environment*, Proceedings of the IASTED International Symposium on High Technology in the Power Industry, Bozeman, Montana, pp. 316-319, Aug. 20-22, 1986.
- [32] C.A. Nucci, *The Lightning Induced Over-Voltage (LIOV) code*, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 4, pp. 2417 - 2418, 2000.

- 
- [33] A. Zeddani, P. Degauque, *Current and voltage induced on a telecommunication cable by a lightning stroke*, Lightning Electromagnetic, R. L. Gardner Ed., Hem. Public. Corp., pp.377-400, 1990.
- [34] C. F. Barbosa, *Campos eletromagnéticos produzidos por descargas atmosféricas: Uma abordagem analítica no domínio do tempo*, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, 2009.