

**ESTUDO DA ABSORÇÃO DE ENERGIA DE  
PARA-RAIOS DE ZNO INSTALADOS EM LINHAS  
DE TRANSMISSÃO DE 138 KV.**

RODRIGO DE OLIVEIRA PEDROSA

**ESTUDO DA ABSORÇÃO DE ENERGIA DE  
PARA-RAIOS DE ZNO INSTALADOS EM LINHAS  
DE TRANSMISSÃO DE 138 KV.**

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

ORIENTADOR: IVAN JOSÉ DA SILVA LOPES

Belo Horizonte

Março de 2013

*Ao meu pai, Elias, à minha mãe, Neusa, à minha irmã, Marcela e ao meu cunhado e amigo, Valdemir. Pessoas fundamentais que me apoiaram, aconselharam e torceram durante esta etapa da minha vida.*

# Agradecimentos

Agradeço, acima de tudo, a Deus, luz do meu caminho e fonte da minha sabedoria. Aos meus queridos pais, alicerces de minha vida, pelos ensinamentos, confiança e incentivos. À minha adorada irmã, Marcela, pela força e carinho. Ao meu cunhado e amigo, Valdemir, por sempre me incentivar, ajudar e torcer pelo meu crescimento. Agradeço também as minhas madrinhas, Lia e Raquel, aos meus primos, César e Flávia, a minha tia Lourdinha e aos demais familiares, por estarem ao meu lado sempre torcendo pela minha vitória. Aos meus grandes amigos, pelo incentivo e pelos momentos de alegria. Em especial, aos meus amigos, Jullierme, Renan e Guilherme, amigos fundamentais que estiveram comigo me ajudando e incentivando na fase mais difícil, o início do Mestrado. Aos meus amigos de laboratório, Alex, Marco Túlio, Diogo, Guilherme, meu agradecimento por, além do incentivo, fazerem do local de trabalho um local familiar, amigo, bom de se trabalhar. Ao meu orientador, Ivan, meu agradecimento mais que especial, além de assistir-me na execução deste trabalho, dando todo o apoio necessário, tornou um grande amigo. A todos os professores, em especial, José Osvaldo, Glássio, Wallace e Antônio Emílio, por todos os ensinamentos e por todo o apoio oferecido. Aos engenheiros Jorge Franco e Sandro de Castro, o meu muito obrigado por todas as valiosas sugestões oferecidas. À todos me resta deixar, mesmo não sendo o suficiente, meu MUITO OBRIGADO!

*“Se tiver que amar, ame hoje. Se tiver que sorrir, sorria hoje. Se tiver que chorar, chore hoje. Pois o importante é viver hoje. O ontem já foi e o amanhã talvez não venha.”*

(André Luís)

# Resumo

A instalação de para-raios de ZnO ao longo das linhas de transmissão tem sido uma solução para melhorar o seu desempenho frente a descargas atmosféricas. Nas linhas na faixa de tensão de operação abaixo de 230 kV, esta técnica tem se mostrado bastante eficiente. Entretanto, existem poucos trabalhos conclusivos a respeito da capacidade de absorção de energia dos para-raios instalados. Sendo a descarga atmosférica um fenômeno estatístico, os para-raios de linha são submetidos a diferentes tipos de descargas e, conseqüentemente, a diferentes montantes de energia que podem stressá-los em demasia. Este trabalho tem por objetivo avaliar a influência que os parâmetros da descarga atmosférica e a modelagem da linha de transmissão têm no cálculo da absorção de energia dos para-raios, e também avaliar, de forma estatística, a energia absorvida pelos para-raios quando da incidência de descargas sobre uma linha de transmissão de 138 kV. Foram consideradas as condições de instalação de para-raios isoladamente na estrutura atingida ou ao longo de todo o sistema. Adicionalmente, avaliou-se a influência da impedância de aterramento da torre atingida, no montante de energia a que os para-raios são submetidos e a sobretensão gerada nas torres das linhas não protegidas por para-raios. Os resultados mostram a importância de se modelar corretamente os componentes de uma linha de transmissão nos programas de cálculos de transitórios eletromagnéticos, considerando torres adjacentes no sistema a ser simulado a fim de se evitar resultados imprecisos. Além disso, o estudo mostra que para-raios Classe 2 instalados nas linhas de transmissão de 138 kV são submetidos a níveis bem inferiores à sua capacidade de energia, sugerindo assim a possibilidade do uso de para-raios Classe 1 nestas linhas, o que levaria a um custo bastante reduzido no projeto de proteção.

**Palavras-chave:** ATP, Coordenação de Isolamento, Descarga atmosférica, Para-raios de linha, ZnO, Linha de Transmissão, MatLab, Transitório Eletromagnético.

# Abstract

Zinc Oxide (ZnO) line arresters are usually installed along overhead transmission lines to improve their lightning performance, particularly in areas with very high soil resistivity and intense lightning activity. For lines rated below 230 kV, this technique has proven to be very effective. However, there are few conclusive studies on the energy absorption capability of the ZnO arresters. Due to the probabilistic nature of lightning parameters, the arresters are subjected to different amounts of energy which may excessively stress them. The present study initially investigates the influence of lightning current parameters and the transmission line modeling on the evaluation of the energy absorption capability of the arresters. The energy absorbed by the surge arresters when lightning strokes a 138 kV transmission line is calculated. A statistical analysis of the energy levels is performed using an interactive routine developed using ATP and MATLAB. Two different scenarios are considered: arresters installed in all phases of the tower stricken by lightning, and arresters installed in all phases of every line tower. The results show the importance of using a correct model to study the ZnO surge arresters energy capability. Furthermore, the study shows that Class 2 arresters, generally installed along 138 kV transmission lines, are subjected to energy levels well below their capacity, suggesting that there is a possibility of using Class 1 arresters instead, which would lead to a reduced cost of the line protection project.

**Keywords:** Transmission Line, Electromagnetic Transient, ATP, Insulation Coordination, Lightning Performance, ZnO line arresters, MatLab.

# Lista de Figuras

2.1	Processo de evolução da descarga atmosférica . . . . .	5
2.2	Exemplo de onda de corrente de Heidler. . . . .	9
2.3	Exemplo de onda de corrente Triangular. . . . .	9
2.4	Curva de probabilidade da amplitude da corrente de descarga atmosférica .	11
2.5	Ruptura de isolamento por flashover. . . . .	13
2.6	Composição da sobrentensão no topo da torre devido ao Backflashover. . .	14
2.7	Exemplo do Modelo Eletrogeométrico. . . . .	15
2.8	Métodos para se melhorar o desempenho das linhas de transmissão . . . .	16
2.9	Número de desligamentos de uma linha de transmissão em função da impe- dância de aterramento. . . . .	17
2.10	Para-raios instalados em paralelo com a cadeia de isoladores de uma linha de 138 kV . . . . .	19
2.11	Curva característica V x I típica de um para-raios de óxido de zinco . . . .	21
2.12	Modelos de para-raios . . . . .	26
3.1	Probabilidade da Corrente de Descarga Atmosférica ser excedida. . . . .	30
3.2	Probabilidade da Taxa de Crescimento (di/dt) ser excedida. . . . .	31
3.3	Desenho ilustrativo do ponto de incidência da descarga atmosférica. . . . .	32
3.4	Geometria da torre de 138 kV. . . . .	33
3.5	Curva V x I do para-raios utilizado. . . . .	34
3.6	Fluxograma descritivo das rotinas de interação entre os programas ATP e MATLAB. . . . .	35
3.7	Circuito Base gerado no ATP. . . . .	36
3.8	Parâmetros da descarga no arquivo .atp. . . . .	37
3.9	Comando usado para execução automática das simulações. . . . .	37
3.10	Detalhes do arquivo de saída de extensão .lis . . . . .	38
4.1	Geometria da torre de 138 kV. . . . .	40

4.2	Desenho ilustrativo do ponto de incidência da descarga atmosférica. . . . .	41
4.3	Tensão no braço da torre da fase C, na fase C e na cadeia de isoladores da fase C. . . . .	41
4.4	Tensão no braço da torre da fase C, na fase C e na cadeia de isoladores da fase C. . . . .	42
4.5	Sobretensão na cadeia de isoladores das fases A, B e C. . . . .	42
4.6	Sobretensão na cadeia de isoladores das fases A, B e C. . . . .	43
4.7	Sobretensão na cadeia de isoladores de todas as fases com para-raios nas fases B e C. . . . .	44
4.8	Sobretensão na cadeia de isoladores de todas as fases com para-raios nas fases B e C. . . . .	44
4.9	Janela de definição dos parâmetros do elemento de resistência não linear do ATP. . . . .	45
4.10	Corrente (kA) no para-raios instalado na fase C da torre onde uma descarga de 50 kA, 1,5 $\mu$ s/50 $\mu$ s incide no seu topo. Sistema com para-raios apenas na torre atingida. . . . .	50
4.11	Probabilidade da Corrente de Descarga Atmosférica com uma Taxa de Crescimento ( $di/dt$ ) ser excedida. . . . .	53
4.12	Energia dissipada pelos PR's das fases A, B e C da torre atingida em função da amplitude da descarga incidente. . . . .	54
4.13	Máxima energia dissipada pelo PR em função da probabilidade de ser excedida. Para-raios instalados nas três fases apenas da torre atingida. $Z = 50 \Omega$ . . . . .	55
4.14	Máxima energia dissipada pelo PR em função da probabilidade de ser excedida. Para-raios instalados nas três fases de todas as torres. $Z = 50 \Omega$ . . . . .	56
4.15	Máxima energia dissipada pelo PR em função da probabilidade de ser excedida. Torres com $Z = 10 \Omega$ . . . . .	57
4.16	Máxima energia dissipada pelo PR em função da probabilidade de ser excedida. Torres com $Z = 80 \Omega$ . . . . .	58
4.17	Máxima energia dissipada pelo PR em função da probabilidade de ser excedida. Torres com $Z = 50 \Omega$ . . . . .	59
4.18	Máxima energia dissipada pelo PR em função da probabilidade de ser excedida. Torres adjacentes com $Z = 10 \Omega$ e torre central com $Z = 50 \Omega$ . . . . .	60
4.19	Máxima sobretensão na cadeia de isoladores das fases A, B e C da torre atingida em função da amplitude da descarga atmosférica. . . . .	62

# Lista de Tabelas

2.1	Parâmetros das Descargas Atmosféricas . . . . .	7
2.2	Índices típicos de densidade de descargas em algumas regiões . . . . .	7
2.3	Isolação típica de linhas . . . . .	18
2.4	MCOV em função da tensão nominal do para-raios. . . . .	24
2.5	Corrente de Descarga Nominal de acordo com a Tensão Nominal. . . . .	24
2.6	Classe de Descarga de Linha dos para-raios. . . . .	25
2.7	Valores de $A_0$ e $A_1$ para o modelo do IEEE . . . . .	27
4.1	Energia dissipada pelo Para-raios x Número de torres adjacentes . . . . .	45
4.2	Máxima Energia absorvida pelos para-raios em função do número de torres do sistema (pico da descarga = 50 kA, tempo de frente = 1,5 $\mu$ s). Pr's apenas na torre atingida. . . . .	47
4.3	Máxima Energia absorvida pelos para-raios em função do número de torres dos sistema (pico da descarga = 50 kA, tempo de frente = 30 $\mu$ s). Pr's apenas na torre atingida. . . . .	47
4.4	Máxima Energia absorvida pelos para-raios em função do número de torres do sistema (pico da descarga = 150 kA, tempo de frente = 1,5 $\mu$ s). Pr's apenas na torre atingida. . . . .	48
4.5	Máxima Energia absorvida pelos para-raios em função do número de torres dos sistema (pico da descarga = 150 kA, tempo de frente = 30 $\mu$ s). Pr's apenas na torre atingida. . . . .	49
4.6	Máxima Energia absorvida pelos para-raios em função do número de torres do sistema (pico da descarga = 50 kA, tempo de frente = 1,5 $\mu$ s, temp de cauda = 50 $\mu$ s). . . . .	51
4.7	Máxima Energia absorvida pelos para-raios em função do número de torres do sistema (pico da descarga = 50 kA, tempo de frente = 1,5 $\mu$ s, tempo de cauda = 250 $\mu$ s). Para-raios instalado apenas na torre onde a descarga incide. . . . .	51

4.8	Máxima Energia absorvida pelos para-raios em função do número de torres do sistema (pico da descarga = 50 kA, tempo de frente = 1,5 $\mu$ s, tempo de cauda = 250 $\mu$ s). Para-raios instalado em todas as torres. . . . .	52
-----	--	----

# Sumário

Agradecimentos	iv
Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	x
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação e Objetivos . . . . .	1
1.2 Organização do Texto . . . . .	3
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>4</b>
2.1 Introdução . . . . .	4
2.2 Descargas Atmosféricas . . . . .	4
2.2.1 Descargas Negativas . . . . .	5
2.2.2 Descargas Negativas Subsequentes . . . . .	6
2.2.3 Parâmetros das Descargas Atmosféricas . . . . .	6
2.3 Interação das Descargas Atmosféricas com o Sistema de Energia . . . . .	12
2.3.1 Flashover . . . . .	12
2.3.2 Backflashover . . . . .	13
2.3.3 Modelo Eletrogeométrico . . . . .	13
2.4 Desempenho das linhas de transmissão frente a Descargas Atmosféricas	15
2.4.1 Métodos de se melhorar o Desempenho das Linhas de Transmissão	16
2.5 Para-raios . . . . .	19
2.5.1 Evolução Histórica . . . . .	19
2.5.2 Características Gerais dos Para-raios de ZnO . . . . .	21

2.5.3	Escolha do Para-raios . . . . .	22
2.5.4	Modelos de para-raios utilizados em programas de cálculo de transitórios . . . . .	25
2.6	Considerações Finais . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>29</b>
3.1	Introdução . . . . .	29
3.2	Modelagem dos Elementos . . . . .	29
3.2.1	Descarga Incidente . . . . .	29
3.2.2	Linha de Transmissão . . . . .	31
3.2.3	Torres . . . . .	32
3.2.4	Impedância de Aterramento . . . . .	33
3.2.5	Para-raios . . . . .	33
3.3	Programa para o cálculo da energia absorvida pelos para-raios de linha	34
3.3.1	Criação do Circuito Base . . . . .	36
3.3.2	Geração dos Parâmetros da Onda de Descarga . . . . .	36
3.3.3	Modificação dos Parâmetros da Descarga . . . . .	36
3.3.4	Execução do Arquivo . . . . .	37
3.3.5	Leitura da Energia . . . . .	37
3.4	Considerações Finais . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>39</b>
4.1	Introdução . . . . .	39
4.2	Validação da Modelagem . . . . .	39
4.2.1	Sobretensão na Cadeia de Isoladores . . . . .	40
4.2.2	Atuação do Para-raios . . . . .	43
4.2.3	Energia absorvida pelos Para-raios . . . . .	43
4.3	Análise de Sensibilidade: número de torres adjacentes consideradas na modelagem . . . . .	46
4.4	Análise Estatística de Energia . . . . .	52
4.4.1	Energia Absorvida . . . . .	54
4.4.2	Sobretensão na Cadeia de Isoladores . . . . .	61
4.5	Considerações Finais . . . . .	63
<b>5</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>65</b>
5.1	Propostas de continuidade do trabalho . . . . .	67
<b>A</b>	<b>Publicações</b>	<b>68</b>



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação e Objetivos

As descargas atmosféricas são as principais fontes de sobretensões em linhas de transmissão aéreas. Geralmente, nas linhas operando em até 230 kV, mais que metade dos desligamentos não programados são ocasionados pelas sobretensões atmosféricas [CIGRE, 2010]. De acordo com estatísticas internacionais, elas são responsáveis por 65% dos desligamentos em linhas de transmissão. Em Minas Gerais especificamente, cerca de 75% dos desligamentos são ocasionados por descargas atmosféricas [Lima, 2010] e [Viana, 2009].

A cada dia, exige-se do sistema elétrico uma confiabilidade cada vez maior. Essa confiabilidade está relacionada com o desempenho das linhas aéreas que pode ser medido pela taxa de desligamentos, usualmente expressa como o número de desligamentos por 100 km por ano. Para se garantir um desempenho aceitável das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, várias ações corretivas são possíveis. As principais formas usualmente adotadas são a adição de cabos para-raios nas linhas, redução da impedância de aterramento da torre, aumento da isolação da linha e aplicação de para-raios de linhas de transmissão [King, 2004].

A instalação de para-raios em paralelo com as cadeias de isoladores das linhas constitui uma técnica atualmente utilizada para se melhorar o desempenho de linhas que apresentam índices de desligamentos elevados, uma vez que são projetados para limitar as tensões entre condutores fase e torre para prevenção de falhas de isolamento. Essa técnica tem se mostrado mais eficiente do que os métodos clássicos de correção no ângulo de blindagem ou da melhoria do sistema de aterramento, principalmente para certas condições de terreno onde a resistividade do solo é alta [Zanetta, 2003]. Nos EUA, nas linhas acima de 230 kV, para-raios têm sido aplicados ao longo dos anos com

excelentes resultados [King, 2004].

Sendo a descarga atmosférica um fenômeno de natureza estatística, os para-raios de linha são submetidos a diferentes intensidades de descargas e, conseqüentemente, a diferentes montantes de energia que podem estressá-los em demasia. Desta forma, torna-se necessário um dimensionamento eficiente do para-raios considerando sua capacidade de absorção de energia, sem no entanto onerar a solução e nem violar aspectos de confiabilidade de instalação.

Estudos de energia em para-raios de linha devem ser feitos de forma estatística de modo a se evitar resultados conservativos. Os parâmetros das descargas atmosféricas (intensidade e duração) assim como os dados da linha de transmissão em análise, tem grande influência no montante de energia a que os para-raios são submetidos. Visto que o alto investimento necessário para aquisição de para-raios de ZnO, bem como que a sua capacidade de absorção de energia é um dos parâmetros que influenciam no custo unitário, um dimensionamento da capacidade de absorção de energia permite uma redução do investimento inicial, possibilitando sua instalação de forma a se garantir a disponibilidade de linhas, permitindo faturamento, evitando multas dos agentes reguladores e desgastes da imagem das concessionárias junto aos consumidores.

Este trabalho insere-se no contexto de forma a investigar os níveis máximos de energia dos para-raios instalados ao longo de linhas de transmissão de 138 kV, para avaliar a relação custo-benefício proveniente da aplicação de para raios nestas linhas de transmissão. Desta forma, primeiramente, é analisada a influência dos parâmetros da descarga atmosférica (tempo de frente, tempo de meia onda e valor de pico da corrente de descarga) e da modelagem dos componentes da linha de transmissão sobre a absorção de energia dos para-raios de ZnO instalados ao longo de linhas de transmissão de 138 kV. Em seguida, é avaliada de forma estatística a energia absorvida por estes para-raios quando da incidência de diferentes descargas. O estudo estatístico é realizado através de um rotina desenvolvida para a interação entre os programas ATP e MATLAB. Em ambas as análises, foram consideradas as condições de instalação de para-raios isoladamente na estrutura atingida ou ao longo de todo o sistema. Avaliou-se, também, a influência da impedância de aterramento da torre atingida no montante de energia a que os para-raios são submetidos. Adicionalmente, um estudo é realizado a fim de se analisar a sobretensão na torre atingida sem para-raios para se verificar o limite da descarga atmosférica que não causa disrupção na cadeia de isoladores desta torre.

## 1.2 Organização do Texto

No Capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica abordando os principais conceitos que servirão de base para todo o trabalho. Dessa forma, são abordadas as descargas atmosféricas, os métodos de se melhorar o desempenho das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas e considerações importantes sobre os para-raios de linhas, principal instrumento de estudo deste trabalho.

No Capítulo 3, são apresentados a modelagem dos elementos utilizados nas simulações do sistema proposto e, também, a descrição do programa desenvolvido para o cômputo automático da energia absorvida pelos para-raios para utilização nas análises estatísticas deste trabalho.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados, com as respectivas análises, oriundos da implementação computacional do modelo apresentado no Capítulo 3. Primeiramente, é feita a validação da modelagem através de exemplos disponíveis na literatura. Logo após, é feita uma análise dos principais parâmetros da modelagem que influenciam no cômputo da energia dissipada pelos para-raios. Em seguida, uma análise estatística é abordada, através da interação entre os programas computacionais MATLAB e ATP, a fim de se evitar resultados imprecisos quanto à energia absorvida pelos para-raios de ZnO instalados nas linhas de transmissão.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões gerais do estudo e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Ao final, o Apêndice A apresenta a modelagem dos elementos da linha de transmissão no programa PSPICE e o Apêndice A lista os trabalhos publicados em Congressos ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

### 2.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentados os principais conceitos adotados no desenvolvimento deste trabalho. A Seção 2.2 descreve a respeito da descarga atmosférica, dos seus principais parâmetros e das formas de se modelá-la nos programas de simulações computacionais. Como grande parte dos desligamentos não programados das linhas de transmissão é ocasionada pelas descargas atmosféricas, a Seção 2.3 trata dos principais mecanismos que podem levar ao desligamento destas linhas e a Seção 2.4 trata dos principais métodos utilizados para se melhorar o desempenho das linhas frente a descargas atmosféricas. A utilização de para-raios em paralelo com a cadeia de isoladores das linhas de transmissão tem sido a técnica utilizada recentemente para melhorar o desempenho, frente a descargas atmosféricas, das linhas que possuem alto índice de desligamentos. Dessa forma, a Seção 2.5 apresenta considerações importantes sobre os para-raios de linha, principal instrumento de estudo deste trabalho, abordando conceitos básicos, história, características principais, métodos de escolha e formas de se modelar o para-raios em programas computacionais de cálculo de transitórios eletromagnéticos.

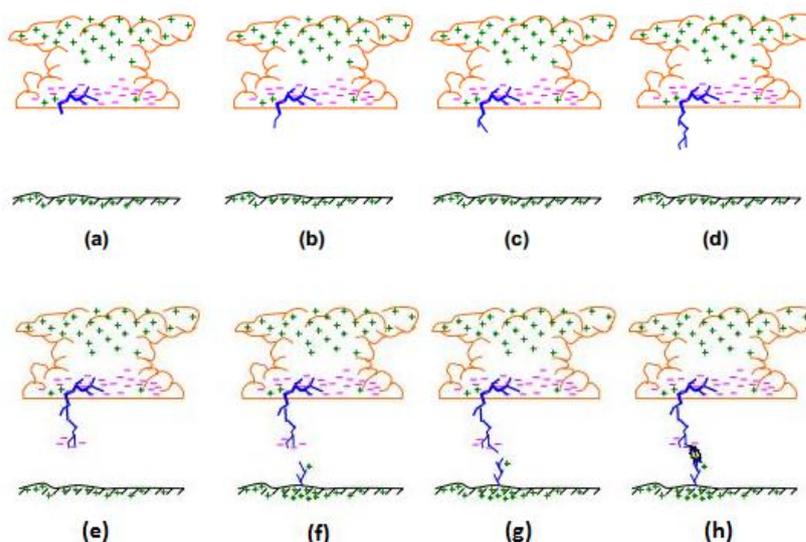
### 2.2 Descargas Atmosféricas

A descarga atmosférica consiste numa intensa descarga elétrica que ocorre na atmosfera. Trata-se de um fluxo de uma corrente impulsiva de alta intensidade e curta duração, que pode ocorrer dentro de uma nuvem carregada, de uma nuvem para outra, de uma nuvem para o solo ou do solo para uma nuvem [Visacro, 2005] e [Viana, 2009].

As sobretensões no sistema elétrico de potência provocadas pelas descargas atmosféricas são as que ocorrem principalmente da nuvem para o solo. Existem dois tipos dessas descargas atmosféricas: a descarga negativa, que transfere carga negativa da nuvem para o solo e a descarga positiva com a transferência de carga positiva para a terra. Apesar das descargas com polaridades positivas serem de maior intensidade, apenas 10% delas atingem as linhas de transmissão [Visacro, 2005], [Visacro, 2007] e [Viana, 2009]. Devido a isso, as subseções seguintes detalham apenas o processo de formação das descargas negativas.

### 2.2.1 Descargas Negativas

A Figura 2.1 exibe o processo de formação de uma descarga descendente negativa.



**Figura 2.1.** Processo de evolução da descarga atmosférica. Adaptada de [Visacro, 2005].

A descarga atmosférica é iniciada por uma ruptura da rigidez dielétrica do ar dentro da nuvem, que guia o desenvolvimento de um canal ionizado, cujo comprimento se estende por vários metros (“stepped leader ou canal precursor da descarga”). Este canal se estende da nuvem para a terra, configurando uma longa coluna de plasma, numa série de passos discretos de aproximadamente 50 metros [Visacro, 2005], [Hileman, 1999] e [King, 2004].

À medida que este canal se aproxima da terra, na região abaixo do canal, o campo elétrico torna-se mais intenso. Quando o canal descendente alcança distâncias de poucas centenas de metros do solo, o campo no solo pode tornar-se muito intenso,

dando origem a descargas elétricas ascendentes. Estas podem ter extensões de várias dezenas de metros e se estendem em direção ao canal descendente da nuvem. Esses canais ascendentes podem ser originados em condutores fases, em cabos guardas, em torres, em construções e até mesmo em árvores que se encontram próximas ao local. Assim como o canal negativo, o canal positivo pode ter diversas ramificações.

Quando o canal descendente e um dos canais ascendentes atingem uma distância crítica, ocorre uma descarga elétrica a qual interliga os dois canais. Uma vez que a conexão entre nuvem e solo é feita, é estabelecida uma onda de corrente de alta intensidade denominada corrente de retorno. Essa corrente atinge seu valor máximo em poucos microsegundos e então, em dezenas ou centenas de microsegundos, cai para metade desse valor.

### 2.2.2 Descargas Negativas Subsequentes

Em grande parte das vezes, as transferências de cargas negativas para a Terra não cessam após o fluxo da corrente de retorno. Através do mesmo canal formado pela descarga principal, podem ocorrer novas descargas alimentadas por outros centros de cargas negativas existentes na nuvem [Visacro, 2005] e [Hileman, 1999].

Uma corrente reduzida, em torno de 500 A, designada de corrente de carregamento do canal ionizado (“dart lead current”), passa a suprir cargas negativas para o canal previamente ionizado. Ao fluir por um pequeno período pelo canal, essa corrente é capaz de armazenar uma carga significativa no canal, dando origem a descarga subsequente, que transferirá essa carga armazenada para o solo por meio de uma corrente de retorno. Esse processo pode se repetir sucessivamente, sendo em média, por três vezes consecutivas. Tais correntes são usualmente menos intensas e muito mais rápidas do que a corrente de retorno principal.

### 2.2.3 Parâmetros das Descargas Atmosféricas

A taxa de incidência, a forma de onda e os tempos típicos da onda de descarga são os principais parâmetros de interesse para a engenharia. A Tabela 2.1 mostra as faixas de valores dos parâmetros da descarga atmosférica.

#### 2.2.3.1 Taxa de Incidência das Descargas

O parâmetro que quantifica a taxa de incidência das descargas atmosféricas é a densidade de descargas local, medido em termos do número de descargas por unidade

**Tabela 2.1.** Parâmetros das Descargas Atmosféricas. Adaptada de [King, 2004].

Parâmetro	Mínimo	Típico	Máximo
Número de correntes de retorno por incidência	1	2 a 4	26
Amplitude da Corrente de Retorno (kA)	1	10 a 30	250
Tempo de pico da corrente ( $\mu\text{s}$ )	$< 0,5$	1,5 a 2	30
Taxa de Crescimento (kA/ $\mu\text{s}$ )	$< 1$	20	210
Tempo de meia onda ( $\mu\text{s}$ )	10	40 a 50	250

de área por ano e usualmente representada por  $N_g$  [Visacro, 2005], [Hileman, 1999] e [King, 2004].

A densidade de descargas local é influenciada por diversos fatores como a distribuição de chuvas na região, a latitude e o relevo local. A Tabela 2.2 ilustra valores típicos de densidade de descargas em diferentes regiões. Nota-se valores de densidade média elevados no Brasil, representando, dessa forma, uma região com um alto índice de solicitação de descargas atmosféricas.

**Tabela 2.2.** Índices típicos de densidade de descargas em algumas regiões. [Visacro, 2005]

Local	Valor Típico de $N_g$ (Desc./ $k_m^2$ /ano)
Alemanha	$(1-1,5)^1$
Áustria	$1,5 (1-6)^1$
França	$1,7 (0,5-5)^1$
Itália	$1,5 (1-5)^1$
Austrália	$(0,2-4)^1$
África do Sul	$4,0 (0,5-14)^1$
Estados Unidos	$2,0 (0,1-14)^1$
México	$(1-10)^1$
Minas Gerais (Brasil)	$4 (1-12)^1$

### 2.2.3.2 Representação da Onda de Corrente

Para representar a onda de corrente de uma descarga atmosférica dois modelos são usualmente adotados: a curva dupla exponencial e a curva de Heidler.

A curva dupla exponencial constitui-se na soma de duas ondas exponenciais de sinais contrários e constantes de tempo de valor diferente.

A adoção deste tipo de curva decorre da facilidade de geração em ambiente laboratorial. Esta pode ser obtida em experimentos por meio da simples descarga de

<sup>1</sup>Faixa de Densidade de Descargas encontradas em cada região ( $N_g$ )

um capacitor em um circuito RC. O fato é que existem diferenças importantes entre as curvas reais da descarga e a dupla exponencial. A natureza côncava da frente de onda da corrente da descarga real nos instantes iniciais não é contemplada pela onda dupla exponencial. Também, existe diferença na derivada máxima de uma onda para a outra.

Tentando suprir essas diferenças existentes entre a onda real e a dupla exponencial, o pesquisador Heidler propôs uma expressão analítica, concebida através de dados obtidos em observações das correntes de retorno em torres monitoradas com instrumentação específica [Visacro, 2005]. A curva é obtida através de uma expressão analítica, chamada Função de Heidler, conforme Equação 2.1.

$$I(t) = \frac{I_o}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} e^{(-t/\tau_2)} \quad (2.1)$$

onde

$$\eta = e^{-(\tau_1/\tau_2)(n\tau_2/\tau_1)^{(1/n)}}$$

$I_o$ : Amplitude da corrente na base do canal.

$\tau_1$ : Constante relacionada ao tempo de frente da onda de corrente.

$\tau_2$ : Constante relacionada ao tempo de decaimento da onda de corrente.

$\eta$ : Fator de correção da amplitude.

$n$ : Expoente (2 a 10).

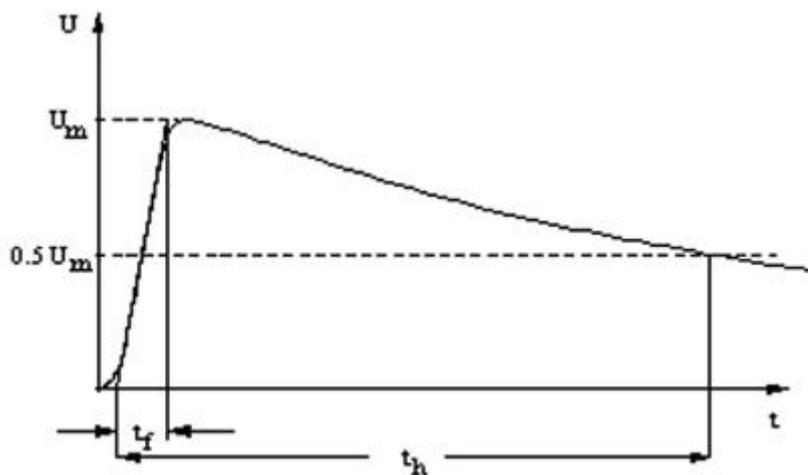
A Figura 2.2 apresenta um exemplo da função de Heidler usada para representação de ondas de correntes de descargas atmosféricas.

Embora estas duas funções traduzam um comportamento mais fiel da onda de corrente da descarga atmosférica, a onda triangular de corrente ideal, mostrada na Figura 2.3, também é bastante utilizada para representar a descarga atmosférica em programas de simulações computacionais [Assis et al., 2012].

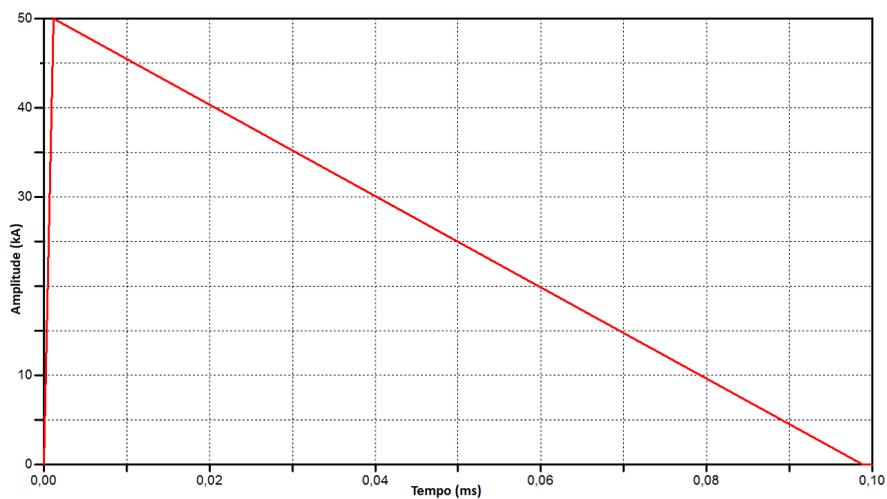
### 2.2.3.3 Amplitude da Corrente de Descarga

A amplitude da corrente de descarga, referida também como valor de pico ou crista da onda de corrente, corresponde ao valor máximo alcançado pela corrente. Usualmente, as ondas da primeira corrente negativa apresentam dois picos, sendo o segundo superior ao primeiro, na maioria das vezes. Observa-se que os valores médios das amplitudes das ondas de descargas negativas são em torno de 30 kA [Visacro, 2005].

A amplitude da descarga atmosférica é de extrema importância pois exerce bastante influência no desempenho das linhas de transmissão. Quando uma descarga atinge uma linha de transmissão, a probabilidade de desligamento da linha dependerá,



**Figura 2.2.** Exemplo de onda de corrente obtida pela aplicação da Função de Heidler. [King, 2004]



**Figura 2.3.** Exemplo de onda de corrente triangular utilizada para representar descargas atmosféricas.

em grande parte, do valor da amplitude das ondas de corrente que incidem no sistema. A Equação 2.2, desenvolvida por J.G. Anderson e utilizada pelo grupo de trabalho do IEEE, é usada para descrever a probabilidade de uma corrente de descarga atmosférica ultrapassar certo valor [Hileman, 1999] e [King, 2004]. De acordo com essa equação, o valor médio das correntes das descargas atmosféricas é de 31 kA pois, a probabilidade da amplitude das descargas atmosféricas que incidem sobre a terra ser maior ou menor que 31 kA é de 50%.

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2,6}}, \quad (2.2)$$

onde:  $I$  é o valor de pico da onda de corrente da descarga e  $P(I)$  é a probabilidade do valor de pico da corrente de descarga  $I$  ser excedida.

A Figura 2.4, apresenta as curvas de distribuição de amplitudes das correntes das descargas atmosféricas de polaridade negativa, sugerida pelo CIGRE e pelo IEEE, baseadas em dados coletados em diversas localidades. A diferença entre as duas curvas se dá pelo fato do grupo de estudo do CIGRE ter adicionado dados de uma outra localidade aos dados até então utilizados pelo IEEE. Embora existam diferenças no início e no final da distribuição, esses novos dados adicionados não alteraram significativamente a distribuição, permanecendo com uma média de, aproximadamente, 31 kA.

#### 2.2.3.4 Tempo de Frente de Onda

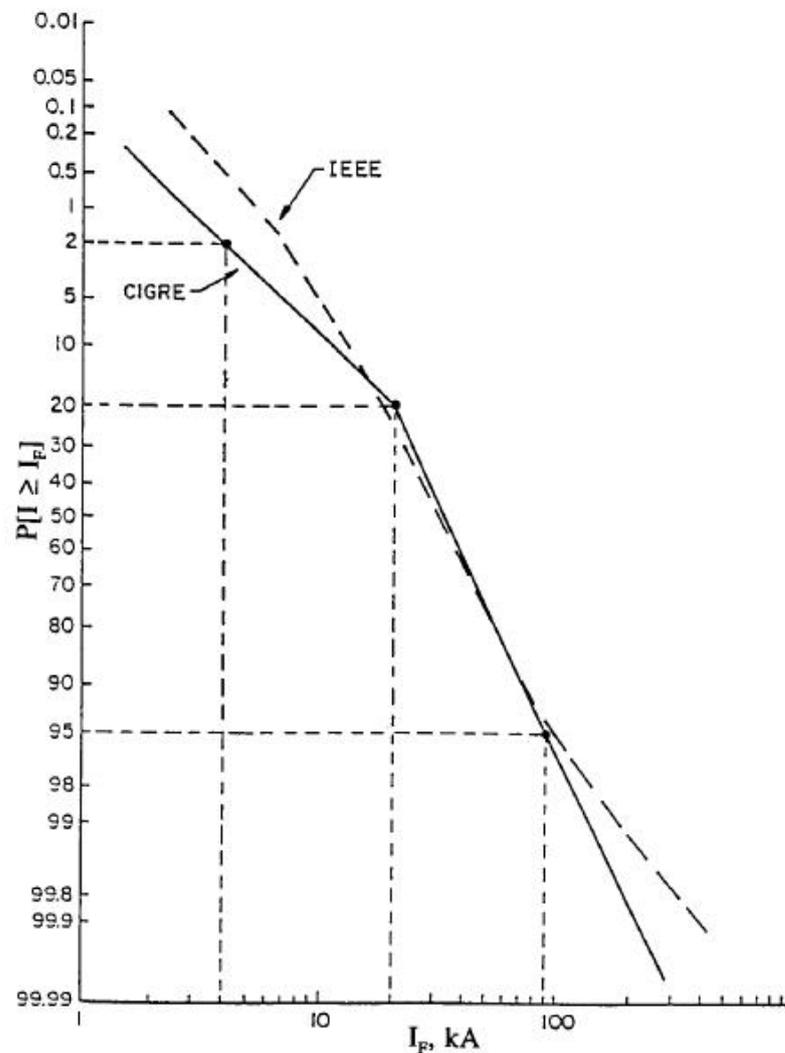
O tempo de frente de onda da corrente de descarga corresponde, de forma simplificada, ao intervalo de tempo decorrido entre o início da onda impulsiva até o alcance do primeiro pico da onda [Visacro, 2005]. A Figura 2.2 exibe o tempo de frente da onda denotado por  $t_f$ .

Para os sistemas elétricos de potência, esse é um dos parâmetros da onda de corrente mais importantes, uma vez que a suportabilidade quanto as sobretensões depende significativamente da inclinação da frente de onda. Dessa forma, a partir de várias medições efetuadas para o tempo de frente de onda, foi possível a obtenção da distribuição estatística da taxa de crescimento de uma corrente de descarga ser superior a uma certa taxa considerada, conforme Equação 2.3 [Zanetta, 2003] e [Viana, 2009].

$$P_{dI} = \frac{1}{1 + \left(\frac{dI}{dt} \frac{1}{24}\right)^4}, \quad (2.3)$$

onde:

$P_{dI}$  é a probabilidade da taxa de crescimento  $(dI/dt)$ , em  $kA/\mu s$ , da corrente de des-



**Figura 2.4.** Curva de probabilidade da amplitude da corrente de descarga atmosférica. [Hileman, 1999]

carga atmosférica  $I(kA)$  ser excedida.

### 2.2.3.5 Tempo de Meia Onda

O tempo de meia onda, usualmente chamado como tempo de cauda, é definido como sendo o tempo decorrido entre o início da onda de descarga e o instante em que a corrente, após ter atingido seu valor de pico (maior pico), atinge 50% deste valor. De acordo com Visacro [2005], os valores médios são da ordem de 230  $\mu s$ , 75  $\mu s$  e 32  $\mu s$  para descargas positivas, primeiras negativas e negativas subsequentes, respectivamente.

A Figura 2.2 ilustra o tempo de meia onda da descarga, denotando-o por  $t_h$ .

O tempo de meia onda é importante principalmente porque a energia a que para-

raios são submetidos aumenta quando descargas com caudas mais longas atingem o sistema [King, 2004].

## 2.3 Interação das Descargas Atmosféricas com o Sistema de Energia

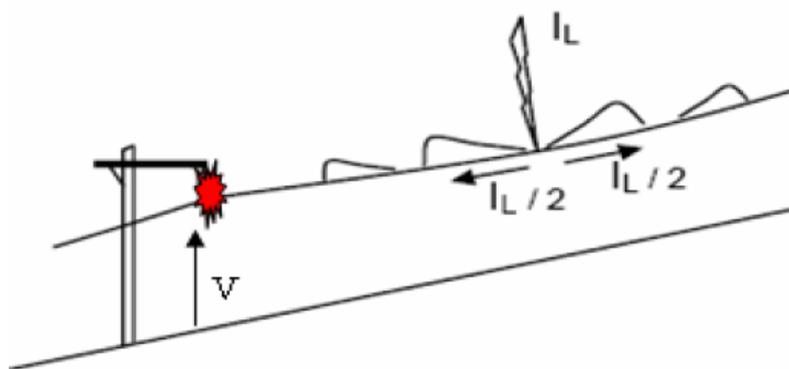
As descargas atmosféricas podem gerar sobretensões no sistema de transmissão através da incidência direta ou indireta. Entende-se por incidência indireta a ocorrência de uma descarga atmosférica próxima à linha, mas que não a atinge. O campo eletromagnético gerado por essas descargas atmosféricas se propaga pelo solo, "iluminando" a linha de transmissão e gerando, dessa forma, uma força eletromotriz que se propaga como uma sobretensão. Essas sobretensões possuem baixa amplitude podendo ocasionar desligamentos apenas nos sistemas de baixa e média tensão, como nos sistemas de distribuição. Como o foco do trabalho está nas linhas com tensão de operação de 138 kV, os efeitos da incidência indireta das descargas não são aqui considerados. As incidências diretas são aquelas em que a descarga atmosférica atinge diretamente os cabos fase, cabos guarda e/ou as torres das linhas de transmissão. As sobretensões causadas por estes fenômenos possuem valores elevados podendo levar a disrupção da cadeia de isoladores da linha e, conseqüentemente, ao seu desligamento. Existem dois mecanismos principais de ruptura por incidência direta de descargas na linha [Visacro, 2007]:

- a) Ruptura de isolamento por incidência de descargas atmosféricas diretamente nos cabos condutores ou Flashover;
- b) Ruptura de isolamento por incidência de descargas atmosféricas nos cabos de blindagem ou Backflashover;

### 2.3.1 Flashover

O flashover é um mecanismo de falha da cadeia de isoladores causados pela incidência de descargas atmosféricas diretamente nos cabos fase da linha. Essa incidência pode ocorrer pela ausência de cabos guarda ou por falha de blindagem do sistema.

A onda de sobretensão gerada por esta incidência é dada, aproximadamente, pelo produto da onda de corrente que se propaga na linha pela impedância de surto da linha. Em muitos casos, essa sobretensão é capaz de causar uma falha de isolamento e um arco elétrico é estabelecido, conectando a fase à estrutura aterrada e, dessa forma, provocando o desligamento da linha. Essa situação é mostrada na figura 2.5.



**Figura 2.5.** Ruptura de isolamento por flashover [Cunha, 2010].

### 2.3.2 Backflashover

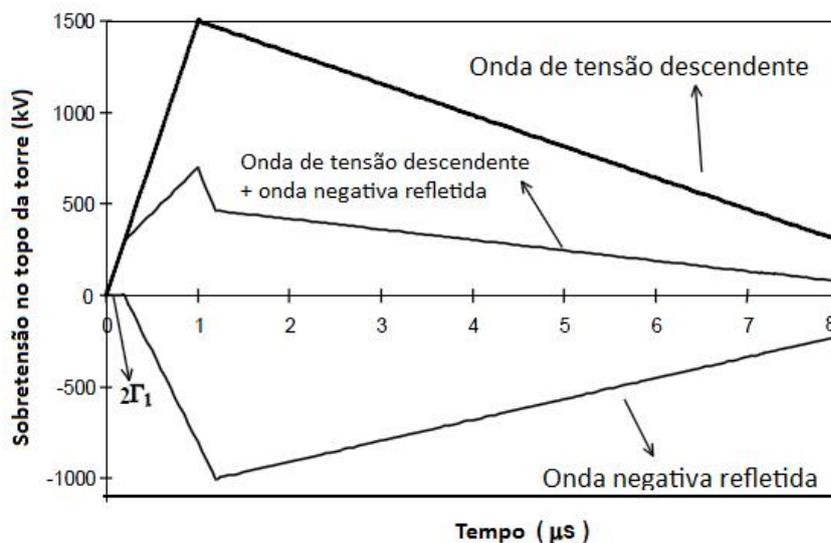
A falha de isolamento de uma linha provocada pela sobretensão resultante na cadeia de isoladores decorrente da incidência direta de descargas no cabo de blindagem ou na torre, foco principal de estudo deste trabalho, é denominada backflashover.

Quando a corrente da descarga e a sobretensão associada se propagam nos cabos de blindagem e encontram a primeira torre aterrada, elas se dividem em três componentes. Uma parcela é refletida, a outra continua se propagando nos cabos de blindagem e a terceira desce a estrutura em direção ao solo. Quando essa onda de sobretensão atinge o solo, ela sofre uma reflexão contribuindo para uma redução na sobretensão da cadeia de isoladores. A Figura 2.6 exhibe a composição da sobretensão resultante na cadeia de isoladores quando descargas atmosféricas atingem a estrutura ou os cabos guarda.

A amplitude da onda refletida dependerá da malha de aterramento das torres. Quanto menor a impedância de aterramento das torres, maior a onda negativa refletida e, conseqüentemente, menor a sobretensão gerada na cadeia de isoladores. Uma vez que valores reduzidos de impedância de aterramento são difíceis de serem obtidos, principalmente devido às condições do solo, o backflashover é o mecanismo mais freqüente de desligamentos não-programados em linhas de transmissão (que possuem cabo de blindagem).

### 2.3.3 Modelo Eletrogeométrico

A instalação de cabos de blindagem, também conhecidos como cabos guarda, é a prática mais usual de prevenção de flashover. Um dos modelos utilizados nos projetos de proteção de linhas de transmissão para o posicionamento dos cabos de blindagem é



**Figura 2.6.** Composição da sobretensão no topo da torre como consequência do Backflashover [Visacro, 2007].

o modelo eletrogeométrico. Este modelo baseia-se no conceito de raio de atração, que é basicamente a distância estimada a partir da qual ocorrerá eventual fechamento do canal precursor da descarga e o canal ascendente originado na estrutura [King, 2004]. Dependendo do valor desse raio de atração, a descarga atmosférica pode atingir os cabos fase, o cabo guarda ou o solo na vizinhança da linha. A Figura 2.7 representa essa situação. Se o canal precursor da descarga adentra na região A, uma descarga para o cabo guarda ocorre; se ele penetra na região B, uma falha de blindagem ocorre e o cabo fase é atingido e se o canal precursor entra na região C, uma descarga para a terra é ocasionada.

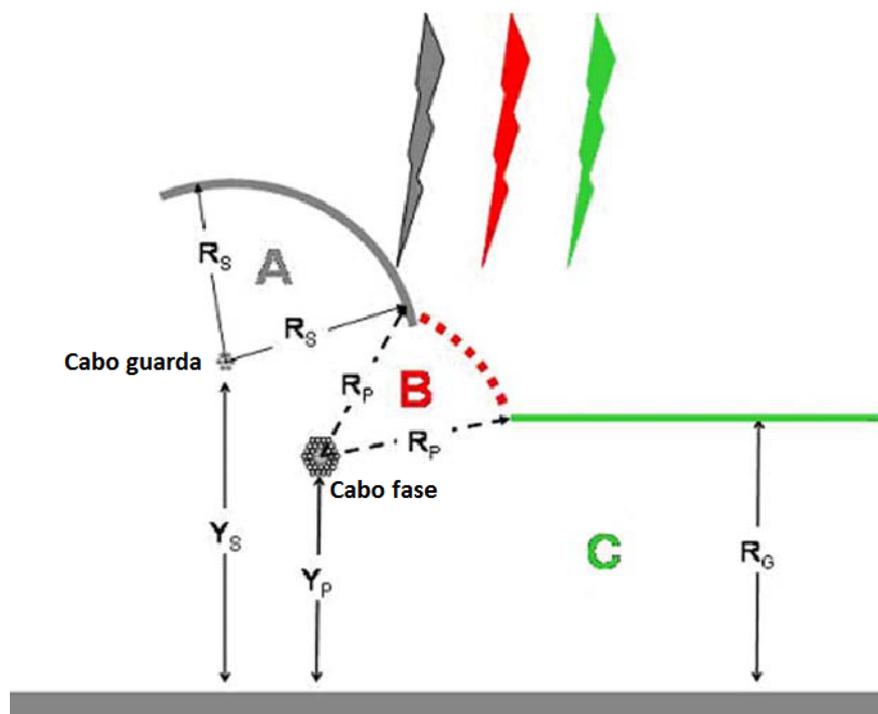
Muitas pesquisas foram realizadas a fim de propor equações para o cômputo destes raios de atração. Todas foram em função da corrente de retorno da descarga e da altura dos condutores. A mais recente foi feita pelo IEEE, em 1997, o qual considerou, além dos raios de atração para os cabos fase e guarda, o raio de atração para a terra. As formulações propostas pelo IEEE estão apresentadas nas Equações 2.4, 2.5 e 2.6.

$$R_s = R_p = 10I^{0,65}, \quad (2.4)$$

$$R_g = [3,6 + 1,7 \ln(43 - Y_c)]I^{0,65} \quad (se \ Y_c < 40 \ m), \quad (2.5)$$

$$R_g = 5,5I^{0,65} \quad (se \ Y_c \leq 40 \ m), \quad (2.6)$$

onde:



**Figura 2.7.** Exemplo do Modelo Eletrogeométrico para uma linha de dois condutores. Adaptada de King [2004].

$R_s$  é o raio de atração para o cabo guarda (m);

$R_p$  é o raio de atração para o cabo fase (m);

$R_g$  é o raio de atração para a terra (m);

$I$  é amplitude da corrente de retorno (kA);

$Y_c$  é a altura média de algum condutor (m);

$Y_p$  é a altura média do condutor fase (m);

$Y_s$  é a altura média do cabo guarda (m).

## 2.4 Desempenho das linhas de transmissão frente a Descargas Atmosféricas

O desempenho das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas é um importante parâmetro utilizado no projeto de isolamento dos equipamentos de potência. Esse desempenho geralmente é medido pelo número de desligamentos por 100 km por ano [Martinez & Castro-Aranda, 2005].

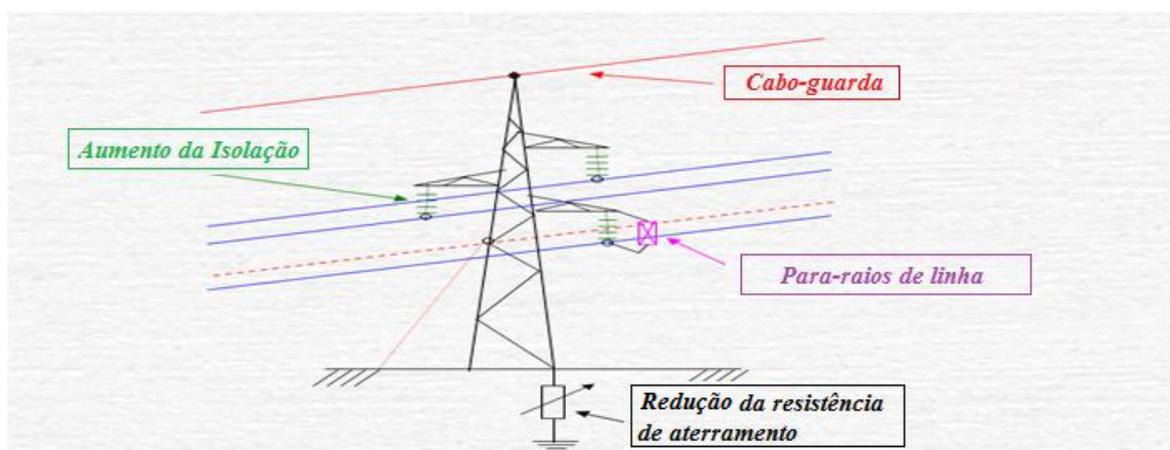
A taxa de desligamentos de uma linha de transmissão pode ser dividida em taxa de desligamentos devido ao fenômeno de backflashover e devido a falha de blindagem,

conforme apresentado na seção 2.3.

Existem diversos programas computacionais disponíveis no mercado para o cálculo do desempenho das linhas frente a descargas atmosféricas: IEEE Flash <sup>1</sup>, EPRI TFlash [Anderson, 2009], Sigma SLP <sup>2</sup>, dentre outros. A complexidade de modelagem de cada um permite diferentes análises e aproximações. O estudo de alocação de para-raios, por exemplo, não é possível ser feito em todos eles.

### 2.4.1 Métodos de se melhorar o Desempenho das Linhas de Transmissão

A cada dia, exige-se do sistema elétrico uma confiabilidade cada vez maior. Para garantir um desempenho aceitável das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, as companhias de energia e os consumidores industriais vêm estudando e promovendo melhorias nas linhas de transmissão aumentando assim sua confiabilidade. Segundo King [2004], várias ações corretivas são possíveis, sendo as principais: melhoria da blindagem, melhoria do aterramento, aumento da isolação e instalação de para-raios de linha. A Figura 2.8 ilustra estes principais métodos.



**Figura 2.8.** Métodos para se melhorar o desempenho das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Adaptada de [Sadovic, 2008].

#### 2.4.1.1 Blindagem

Instalar ou adicionar cabos guardas de linhas de transmissão constitui-se de um método para se melhorar o desempenho das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Uma linha com uma blindagem pobre pode permitir um número excessivo

<sup>1</sup>Informações e download do programa pode ser obtido em <http://ewh.ieee.org/soc/pes/lpdl/>

<sup>2</sup>Informações sobre o programa pode ser obtido em <http://www.sadovic.com/>

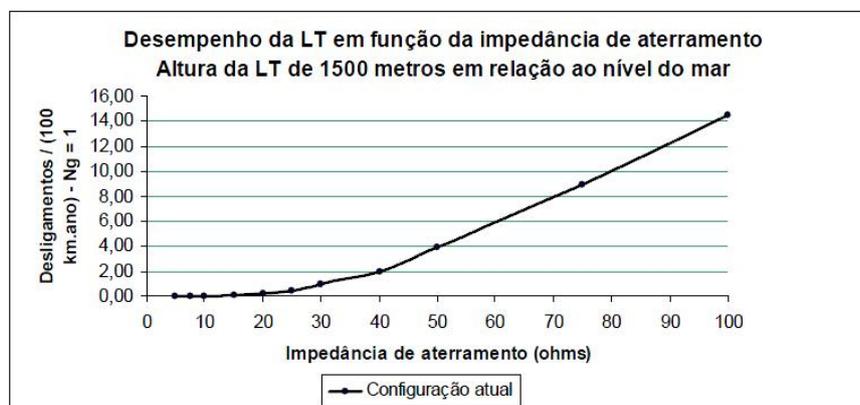
de descargas atmosféricas incidindo sobre os condutores fases e causando um número significativo de desligamentos. Dessa forma, linhas com blindagens mais efetivas estão sujeitas a menores falhas de blindagens e, conseqüentemente, a menores taxas de desligamento.

#### 2.4.1.2 Aterramento

Como visto na seção 2.3, grande parte das falhas de isolação ocorre como conseqüência do fenômeno de Backflashover. Uma forma de se reduzir a sobretensão desenvolvida no alto da torre devido a este fenômeno e, conseqüentemente, reduzir a taxa de desligamentos da linha, é garantir baixos valores para a impedância das malhas de aterramento das torres das linhas de transmissão [Lima, 2010].

A redução na impedância de aterramento faz com que a intensidade da onda negativa refletida aumente, diminuindo dessa forma, a sobretensão na cadeia de isoladores.

A Figura 2.9 apresenta um estudo realizado para a estimativa do número de desligamentos de uma linha de transmissão de 220 kV em função da impedância do sistema de aterramento ( $N_g = 1$  descarga / ( $km^2 \cdot ano$ ), vão médio = 450m). Observa-se que quanto maior a impedância da malha de aterramento, maior o número de desligamentos da linha e, conseqüentemente, pior o desempenho da linha.



**Figura 2.9.** Número de desligamentos de uma linha de transmissão em função da impedância de aterramento [Franco, 2001].

Este método apresenta melhorias significativas no desempenho de linhas de transmissão providas de cabos pára-raios e altas impedâncias de aterramento. No entanto, muitas das vezes, somente a melhoria da impedância de aterramento e/ou instalação de cabos contrapesos nas bases das estruturas, deixa de ser uma solução viável sob os pontos de vista técnico e/ou econômico.

### 2.4.1.3 Isolação

Um aumento no número de isoladores das linhas faz com que haja uma redução nos desligamentos das linhas, uma vez que significa, via de regra, aumentar a distância de arco a seco das cadeias de isoladores, o que implica no aumento do nível de suportabilidade das cadeias de isoladores (CFO). Segundo King [2004], aumentar o CFO dos isoladores das linhas é um método viável, do ponto de vista de desempenho frente a descargas atmosféricas, apenas nas linhas com tensão de operação até 100 kV, pois, nestas linhas, ter-se-á uma redução significativa dos desligamentos causados por tensões induzidas. Já nas linhas com tensão de operação acima de 100 kV, um aumento na isolação pode significar um aumento no desempenho frente a descargas atmosféricas mas uma redução no desempenho frente a surtos de manobras e sobreensões temporárias. Um aumento da cadeia de isoladores pode causar, em determinadas condições ambientais e ventos fortes, um deslocamento e balanço das fases que podem aproximá-las das estruturas aterradas das torres, diminuindo a distância elétrica entre essas estruturas. Dessa forma, nestas linhas acima de 100 kV, essa prática se torna inviável.

A Tabela 2.3 mostra a isolação típica utilizada nas linhas de acordo com sua respectiva tensão de operação.

**Tabela 2.3.** Isolação típica de linhas. [King, 2004]

Tensão Nominal (kV)	Número de isoladores (146 mm x 255 mm)
46	3-4
69	4-6
115	7-9
138	7-10
161	10-12
230	11-14
345	15-18
500	22-28
765	30-37

### 2.4.1.4 Para-raios

A instalação de para-raios em paralelo com as cadeias de isoladores das linhas constitui uma técnica atualmente utilizada para se melhorar o desempenho de linhas que apresentam índices de desligamentos elevados. Essa técnica tem se mostrado mais eficiente do que os métodos clássicos de correção do ângulo de blindagem ou da melhoria

do sistema de aterramento, principalmente para piores condições topográficas e de resistividade do solo da região atravessada pela linha de transmissão. Por ser o foco do trabalho, o para-raios será apresentado de forma mais detalhada na seção seguinte.

A Figura 2.10 ilustra uma linha de 138 kV protegida por para-raios instalados em paralelo com as cadeias de isoladores de todas as suas fases.



**Figura 2.10.** Para-raios instalados em paralelo com a cadeia de isoladores de uma linha de 138 kV [Tyco, 2008].

## 2.5 Para-raios

Os para-raios de linha são dispositivos de proteção para os sistemas elétricos de potência cuja principal finalidade é reduzir as sobretensões transitórias que possam, eventualmente, ocorrer nos sistemas, evitando que os níveis de isolamento das cadeias de isoladores sejam excedidos [Diniz, 2011], [Franco, 2001] e [King, 2004].

### 2.5.1 Evolução Histórica

Apesar da aplicação dos para-raios para melhoria do desempenho de linhas de transmissão ter sido amplamente utilizada apenas no final da década de 70, equipamentos de proteção contra descargas atmosféricas já vem sendo utilizados há mais de

100 anos, desde o início das linhas de transmissão, através de centelhadores e resistores não lineares. A grande utilização dos para-raios nos dias de hoje só foi possível após um grande processo de aperfeiçoamentos destes equipamentos.

As primeiras proteções, realizadas no final do século XIX, eram feitas por simples centelhadores separados por ar. Nestes centelhadores, a ignição do arco elétrico ocorria em uma tensão relativamente baixa, suficiente para fornecer excelente proteção contra descargas atmosféricas mas, insuficiente para extinguir a corrente de frequência industrial, a menos que um resistor de alto valor fosse conectado em série, o que o tornou inviável na época [Sakshaug, 1991].

Em 1908, surgiu o primeiro equipamento empregando um elemento não linear. Este dispositivo de proteção era composto de um gap esférico em série com um tanque contendo células não lineares a base de alumínio. Este equipamento apresentou uma boa limitação de corrente, mas as tensões de descargas eram altas e aleatórias, havendo ainda o inconveniente do tamanho.

Por volta de 1920, surgiram os primeiros para-raios do tipo expulsão. Dois centelhadores conectados em série e montados dentro de um tubo isolante constituíam estes para-raios. Segundo Diniz [2011], o seu funcionamento baseava-se na distribuição não uniforme de tensão sobre eles como consequência dos diferentes materiais dielétricos dos centelhadores. O início da interrupção ocorria no centelhador superior. Com isso, toda a tensão passava a ser aplicada no centelhador inferior, iniciando o processo de formação do arco em seu dielétrico. Este dielétrico gerava gases provocando a deionização do arco e, conseqüentemente, a interrupção da corrente de frequência industrial de forma natural quando da passagem da corrente pelo zero. Por apresentarem vida útil muito reduzida, foram pouco utilizados.

Em 1930, surgiram os resistores não lineares a base de carboneto de silício (SiC). Estes resistores, associados com um conjunto de centelhadores, produziam uma proteção muito mais eficaz do que os equipamentos de proteção utilizados até aquele momento. Estes resistores à base de SiC possibilitaram a criação de dispositivos para-raios bem menores e com tensões de disparo significativamente reduzidas. Para-raios de SiC são utilizados até os dias de hoje, embora com o passar dos anos, sua utilização se tornará inviável pela falta de aperfeiçoamentos destes dispositivos.

Em meados da década de 70, surgiram os varistores de óxido metálico, capazes de suportar as elevadas tensões nominais dos sistemas elétricos de potência sem a necessidade do uso de centelhadores. Este novo material possibilitou a criação dos para-raios de óxido metálico (MO) com uma capacidade de absorção de energia duas vezes maior que a promovida pelos para-raios de SiC. Para-raios de óxido metálico foram introduzidos nos EUA por Sakshaug em 1977 [Hileman, 1999]. Devido à falta

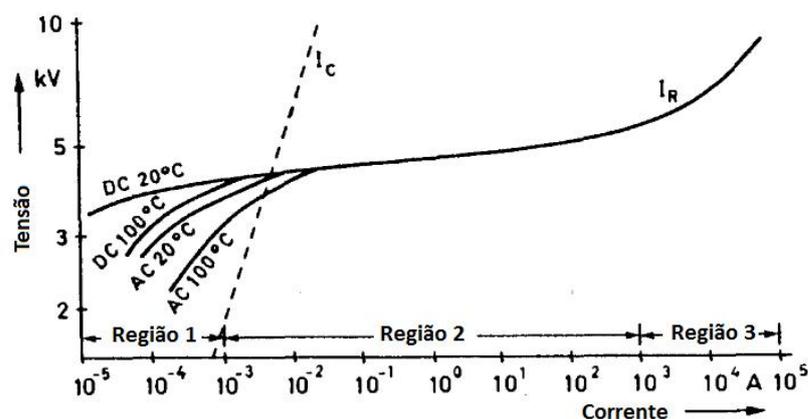
de conhecimento sobre a estabilidade e a vida útil dos materiais de óxido metálico, os primeiros para-raios de óxido metálico continham centelhadores, de forma a reduzir a tensão de frequência industrial colocada entre os blocos. Com o passar dos anos e com um conhecimento mais avançado destes materiais, os centelhadores foram sendo descartados e os para-raios sem centelhadores foram sendo utilizados.

A aplicação dos para-raios de óxido metálico para linhas de transmissão iniciou-se por volta dos anos 80 nas linhas de 66, 77 e 138 kV [CIGRE, 1999]. Hoje, embora ainda existam para-raios de SiC nas redes de distribuição, em linhas de transmissão e subestações, os novos para-raios instalados são todos de óxido metálico. Isso porque este tipo de para-raios, segundo Hileman [1999], possui grandes vantagens em relação aos de SiC. As principais vantagens são:

1. Simplicidade de projeto, o que melhora a qualidade global e reduz a entrada de umidade;
2. Eliminação do centelhador externo;
3. Aumento da capacidade de absorção de energia.

## 2.5.2 Características Gerais dos Para-raios de ZnO

Um fator extremamente importante para a caracterização do comportamento de um para-raios é a definição da curva  $V \times I$  deste equipamento. De acordo com Hileman [1999], a curva característica de um para-raios de óxido metálico apresenta uma característica não linear e pode ser dividida em três regiões, conforme Figura 2.11.



**Figura 2.11.** Curva característica  $V \times I$  típica de um para-raios de óxido de zinco [Hileman, 1999].

A Região 1 é a da seleção da máxima tensão de operação contínua do para-raios (MCOV), ou seja, é a máxima tensão eficaz (rms) fase-terra à frequência industrial que

pode ser aplicada continuamente ao para-raios. Este valor de tensão é fornecido pelo fabricante, sendo da ordem de 80% a 90% da tensão nominal do pára-raios [Zanetta, 2003]. Nesta região, a corrente é menor que 1 mA e é primariamente capacitiva. Na Região 2, uma pequena variação na tensão implica em uma grande variação de corrente. Essa região é conhecida como a região de TOV (transient over voltage) e surto de chaveamento. É admissível que o pára-raios opere nesta região por até 10 s. Tal região é responsável pela suportabilidade dos para-raios frente aos transitórios em 60 Hz que possam surgir no sistema elétrico. Caso o para-raios seja submetido a uma operação, nesta região, por um tempo superior a 10 s, a corrente de fuga associada elevará a temperatura das pastilhas de ZnO que, por sua vez, elevará a corrente de fuga do para-raios, danificando-o [Viana, 2009]. A Região 3 é a região de proteção do para-raios contra descargas atmosféricas. Nesta região, a corrente varia entre 1 e 100 kA, e possui uma relação aproximadamente linear com a tensão.

Um outro fator importante para caracterização do para-raios, e objeto de estudo neste trabalho, é a capacidade de absorção de energia dos para-raios. A capacidade de absorção de energia de um para-raios é a capacidade do para-raios de absorver uma dada energia sem que haja comprometimento de sua integridade física [Viana, 2009]. A capacidade de absorção de energia de um para-raios é baseada na característica construtiva de suas pastilhas de óxido de zinco. Para-raios de ZnO normalmente possuem capacidade de absorção de energia na faixa de 2 a 7 kJ/kV de sua tensão nominal [Zanetta, 2003]. A energia absorvida por um para-raios pode ser obtida pela integral da curva de potência, de acordo com a Equação 2.7:

$$E = \int_{t_i}^{t_f} v(t)i(t)dt, \quad (2.7)$$

onde:

$v(t)$  é a tensão sobre o para-raios;

$i(t)$  é a corrente drenada pelo para-raios;

$t_i$  é o tempo onde se inicia a circulação de corrente pelo para-raios;

$t_f$  é o tempo onde se cessa a circulação de corrente pelo para-raios.

### 2.5.3 Escolha do Para-raios

O desempenho adequado dos para-raios nas linhas está condicionado ao correto dimensionamento de suas características em relação ao sistema. De acordo com CIGRE [1999] e Hinrichsen [2001], para selecionar um para-raios de óxido metálico sem centelhadores é necessário especificar principalmente os seguintes parâmetros: tensão

nominal ( $U_r$ ), máxima tensão de operação contínua (MCOV), corrente de descarga nominal ( $I_n$ ) e a classe de descarga de linha. As seções seguintes referem-se à descrição e ao método de determinação de cada parâmetro referido acima.

### 2.5.3.1 Tensão Nominal ( $U_r$ ) e Máxima Tensão de Operação Contínua (MCOV)

A tensão nominal e a tensão de operação contínua de um para-raios são diretamente relacionadas. Ambas relacionam-se a máxima tensão fase-terra à frequência industrial que pode ser aplicada continuamente através dos terminais do para-raios.

Para determinar a tensão de operação contínua do sistema, o tipo de aterramento do neutro é uma questão decisiva, uma vez que essa tensão deve ocorrer dentro de um período ininterrupto de, no mínimo, 30 segundos. Essa seção aborda apenas o cálculo da tensão nominal do para-raios para sistema com neutro solidamente aterrado. Assim, de acordo com a Equação 2.8, a tensão de operação contínua que o para-raios deve suportar é a tensão eficaz fase-terra do sistema adicionada de uma margem de, no mínimo, 5%. Essa margem cobre os possíveis aumentos na amplitude da tensão ocasionados pelos possíveis harmônicos que ocorrem no sistema [Hinrichsen, 2001].

$$U_{c,min} \geq 1,05U_s/\sqrt{3}, \quad (2.8)$$

onde:

$U_{c,min}$  é a tensão de operação contínua sobre o para-raios;

$U_s$  é a tensão fase-fase do sistema.

Dessa forma, uma vez determinada a tensão de operação contínua a que o para-raios é submetido, uma possível tensão nominal do para-raios é determinada através da Equação 2.9. O fator 1,25 é um valor empírico, utilizado pelos fabricantes na especificação de quase todos os tipos de para-raios de óxido metálico.

$$U_r \geq 1,25U_{c,min}, \quad (2.9)$$

onde:

$U_r$  é a tensão nominal do para-raios calculada através da máxima tensão de operação contínua.

A Tabela 2.4 apresenta os valores da tensão nominal e da MCOV para diversos para-raios fabricados pela Balestro. Nota-se que a tensão máxima de operação contínua do para-raios é sempre menor que a tensão nominal do mesmo.

**Tabela 2.4.** MCOV em função da tensão nominal do para-raios [BALESTRO, 2010].

Tensões Nominais $U_r(kV)$	Tensões de Operação Contínua MCOV $U_c(kV)$
21	17
36	29
60	48
72	58
120	98
192	154

### 2.5.3.2 Corrente de Descarga Nominal

A corrente de descarga nominal serve para classificar um para-raios de óxido metálico. A norma IEC 60099-4 especifica 5 diferentes valores de corrente de descarga nominal para diferentes tensões nominais dos para-raios, como mostra a Tabela 2.5.

**Tabela 2.5.** Corrente de Descarga Nominal de acordo com a Tensão Nominal [Hinrichsen, 2001].

1500A	2500A	5000A	10000A	20000A
–	$U_r \leq 36kV$	$U_r \leq 132kV$	$3kV \leq U_r \leq 360kV$	$360kV \leq U_r \leq 756kV$

Os valores apresentados na Tabela 2.5 não se referem exatamente às características de operação do equipamento. No entanto, esses valores especificam diferentes demandas e requisitos de ensaios a que o equipamento deve ser submetido.

Embora a norma IEC 60099-4 classifique em 5 categorias a corrente de descarga nominal dos para-raios, segundo Hinrichsen [2001], para-raios para sistemas de alta tensão são usualmente classificados em apenas duas, 10 kA e 20 kA. A principal diferença entre essas duas classes está na classe de descarga da linha, item que será abordado na próxima seção.

### 2.5.3.3 Classe de Descarga de Linha

A classe de descarga de linha é uma classificação dada apenas aos para-raios dos sistemas de alta tensão. De acordo com a norma IEC 60099-4, os para-raios são classificados em 5 categorias onde cada classe de descarga de linha especifica a capacidade de absorção de energia dos para-raios. A Tabela 2.6 exhibe as cinco classes de descarga de linha com suas respectivas correntes de descarga nominal e capacidades de absorção de energia. Um para-raios de 10 kA de corrente de descarga nominal pode ser classificado em três classes de descarga de linha (1 a 3), enquanto um para-raios

de 20 kA, apenas em duas (4 ou 5). Dessa forma, antes de se especificar a classe de descarga de linha, deve-se determinar a corrente de descarga nominal do para-raios. Assim, por exemplo, um para-raios de 10 kA de corrente de descarga nominal para um sistema de 138 kV, poderá ser das classes 1 a 3, dependendo da sua capacidade de absorção de energia.

A capacidade de absorção de energia é verificada através de um teste de corrente de longa duração e um teste de carga operacional com surtos de comutação. No teste de carga operacional, o para-raios é submetido a dois impulsos de amplitude e duração específicas, após os quais deve manter uma estabilidade térmica com a tensão de operação do sistema [ABB, 2004].

**Tabela 2.6.** Classe de Descarga de Linha dos para-raios. Adaptada de [Hinrichsen, 2001] e [ABB, 2004].

CDL <sup>1</sup>	Tensão do Sistema (kV)	CDN <sup>2</sup> (kA)	CAE <sup>3</sup> ( $kJ/kV de U_r$ )
1	$\leq 245$	10	1,8 a 2,2
2	$\leq 300$	10	4,5 a 5,5
3	$\leq 420$	10	8
4	$\leq 550$	20	11
5	$\leq 800$	20	15

#### 2.5.4 Modelos de para-raios utilizados em programas de cálculo de transitórios

Assim como a modelagem da onda de corrente da descarga atmosférica, o para-raios também pode ser modelado nos programas computacionais de cálculos de transitórios de diversas maneiras. O modo mais simples, ou ideal, de se modelar um para-raios é considerá-lo como uma chave controlada por tensão em série com uma fonte de tensão. Uma vez atingida a tensão de disparo do para-raios ou seja, a tensão de fechamento da chave, ela se fecha mantendo a tensão, no ponto em questão, em um valor constante determinado pela fonte de tensão. Também podemos considerá-lo como um resistor não linear, conhecendo-se a curva V x I característica do para-raios. De acordo com Hileman [1999] e CIGRE [2010], o IEEE e o CIGRE vem propondo modelos mais sofisticados de forma a representar mais fielmente as características dos para-raios.

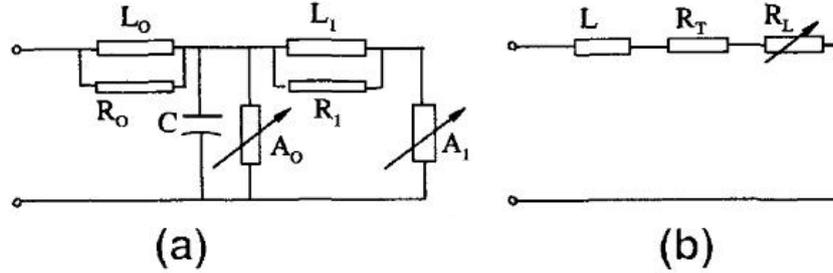
---

<sup>1</sup>Classe de Descarga de Linha

<sup>2</sup>Corrente de Descarga Nominal

<sup>3</sup>Capacidade de Absorção de Energia

Apresentam-se na Figura 2.12 os modelos propostos pelo IEEE e pelo CIGRE, respectivamente. O modelo do IEEE é composto de dois elementos não lineares ( $A_0$  e  $A_1$ ) separados por uma rede de resistência e indutância. Já o modelo do CIGRE possui apenas um elemento não linear ( $R_L$ ).



**Figura 2.12.** Modelos de para-raios. (a) IEEE. (b) CIGRE [Hileman, 1999].

Os parâmetros do modelo do IEEE podem ser obtidos a partir das Equações 2.10 a 2.14.

$$L_0 = 0.2 \frac{d}{n} (\mu H), \quad (2.10)$$

$$L_1 = 15 \frac{d}{n} (\mu H), \quad (2.11)$$

$$R_0 = 100 \frac{d}{n} (\Omega), \quad (2.12)$$

$$R_1 = 65 \frac{d}{n} (\Omega), \quad (2.13)$$

$$C = 100 \frac{n}{d} (pF), \quad (2.14)$$

onde:

$n$  é o número de colunas paralelas de discos de óxido metálico no para-raios;  
 $d$  é a altura do para-raios em metros.

O capacitor  $C$  representa a capacitância externa dos pára-raios, devido à altura do equipamento em relação ao solo. A indutância  $L_0$  representa a indutância associada ao campo magnético junto ao pára-raios. O resistor  $R_0$  é utilizado para estabilizar a integração numérica permitindo a modelagem em programas computacionais que não possuem esta capacidade de integração numérica, tais como o ATP [Viana, 2009].

As curvas características  $V \times I$  dos elementos não lineares do modelo podem ser obtidas da Tabela 2.7.

**Tabela 2.7.** Valores de  $A_0$  e  $A_1$  para o modelo do IEEE [Hileman, 1999].

Corrente (kA)	Tensão em pu de 10 kA, 8/20 $\mu$ s para $A_0$	Tensão em pu de 10 kA, 8/20 $\mu$ s para $A_1$
0,01	0,875	–
0,1	0,963	0,769
1	1,050	0,850
2	1,088	0,894
4	1,125	0,925
6	1,138	0,938
8	1,169	0,956
10	1,188	0,969
12	1,206	0,975
14	1,231	0,988
16	1,250	0,994
18	1,281	1,000
20	1,313	1,006

Para o modelo do CIGRE, mostrado na Figura 2.12 (b),  $R_T$  pode ser obtida da mesma forma que  $R_0$  na Equação 2.12 e  $L$ , que é a indutância do caminho percorrida pela corrente no para-raios, pode ser representada por uma simples indutância com valor de 0,33  $\mu$ H/m ou 1  $\mu$ H/m do comprimento do para-raios, dependendo do tipo de instalação do para-raios. O resistor não linear  $R_L$  refere-se as características tensão-corrente do para-raios utilizado.

## 2.6 Considerações Finais

Neste capítulo foi feita uma revisão bibliográfica sobre os principais assuntos abordados no decorrer deste trabalho. Uma vez que o objetivo do trabalho se enquadra no contexto da melhoria do desempenho das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, foi apresentada, neste capítulo, uma revisão dos conceitos básicos envolvendo os principais parâmetros das descargas atmosféricas, dos métodos de se melhorar o desempenho das linhas frente a descargas atmosféricas, dando uma atenção especial aos para-raios de linha, comumente utilizados para a melhoria de desempenho das linhas frente a descargas atmosféricas e principal objeto de estudo neste trabalho. Também, foi mostrado que existem diversas formas de se modelar os componentes de uma linha de transmissão nos programas computacionais de cálculo de transitórios eletromagnéticos. A onda de corrente da descarga atmosférica, por exemplo, pode ser modelada como uma onda ideal triangular, como uma onda dupla exponencial e, mais

realisticamente, como uma função de Heidler. Já os para-raios podem ser representados por uma simples chave controlada por tensão, por resistores não lineares e por modelos mais sofisticados como os propostos pelo IEEE e pelo CIGRE. Dessa forma, de acordo com cada aplicação, é preciso escolher, de forma adequada, os modelos de cada elemento do sistema a ser simulado. O próximo capítulo trata da modelagem dos elementos utilizados nas simulações realizadas neste trabalho e descreve a metodologia utilizada nas análises estatísticas do trabalho.

# Capítulo 3

## Metodologia

### 3.1 Introdução

Como mostrado no Capítulo 2, existem diversas maneiras de se modelar a onda de corrente da descarga atmosférica e os componentes de uma linha de transmissão nos programas computacionais de cálculo de transitórios eletromagnéticos. De acordo com cada aplicação, é preciso modelar de maneira apropriada cada elemento do sistema a ser simulado. Dessa forma, este capítulo abrange a modelagem dos elementos utilizados nas simulações do sistema proposto e, também, descreve a metodologia utilizada nas análises estatísticas deste trabalho.

### 3.2 Modelagem dos Elementos

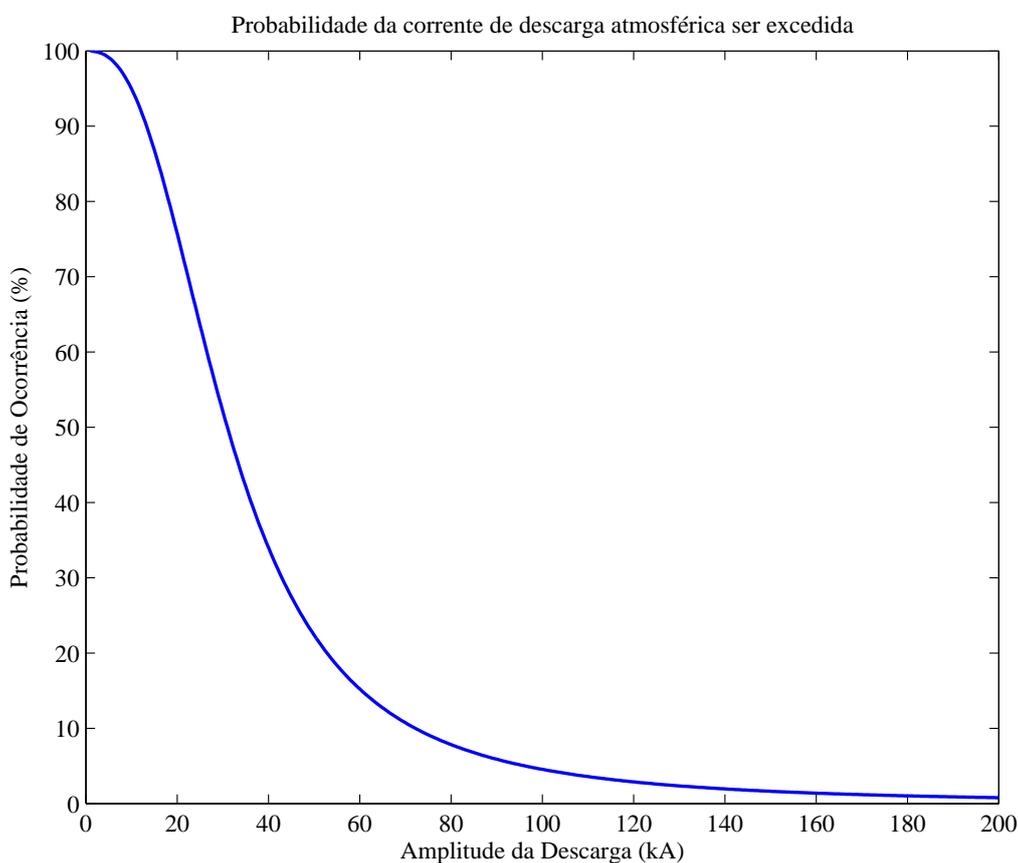
As simulações foram realizadas no programa de transitórios eletromagnéticos ATP, onde se considerou um passo de cálculo de 1 ns, de forma a ser pequeno o suficiente para não causar perdas de informações nos cálculos. Os modelos utilizados são descritos a seguir.

#### 3.2.1 Descarga Incidente

O surto incidente foi modelado segundo uma onda triangular, conforme mostrado na Figura 2.3, com amplitudes, tempos de frente e cauda variáveis de acordo com cada análise em questão.

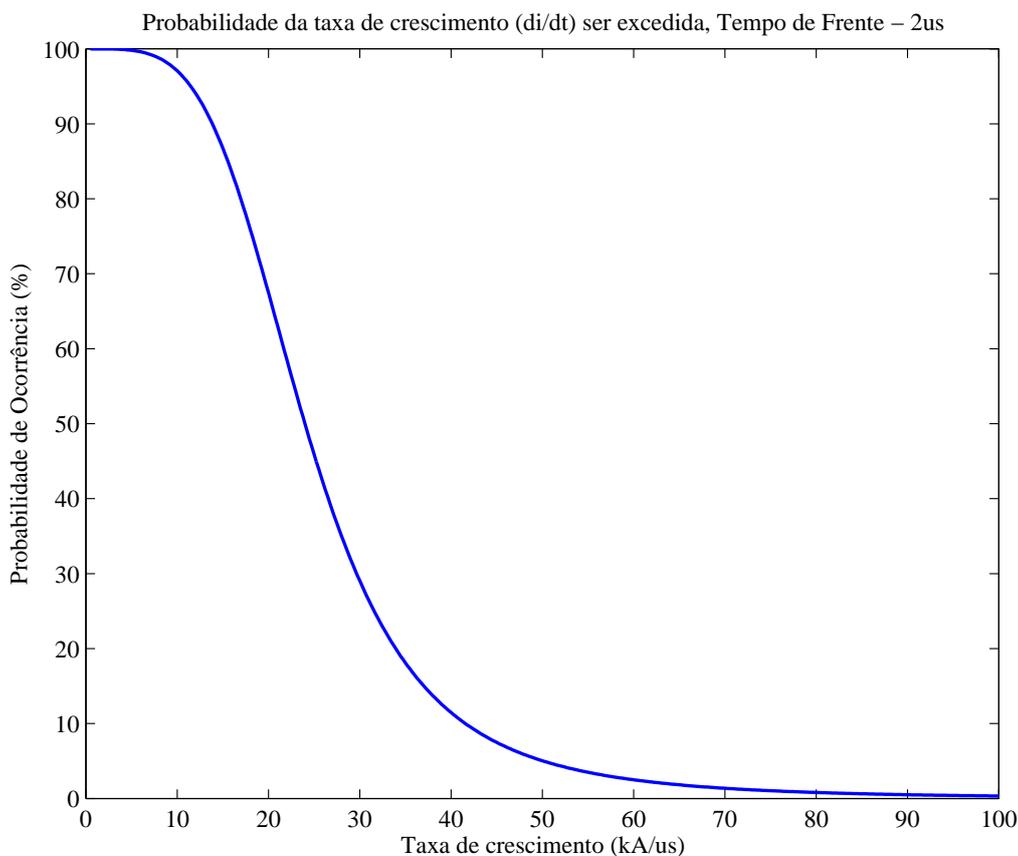
Para a análise de sensibilidade, que será apresentada no Capítulo 4, os parâmetros das descargas simuladas foram escolhidos, de acordo com a Tabela 2.1, de forma a corresponder a descargas típicas mas, também, descargas que eventualmente pos-

sam incidir no sistema e estressar em demasia os para-raios. Assim, foram simuladas descargas com amplitudes de 50 kA e 150 kA, tempos de frente de 1.5  $\mu$ s e 30  $\mu$ s e tempos de cauda de 10  $\mu$ s, 50  $\mu$ s e 250  $\mu$ s. Já para a análise estatística, a descarga incidente foi modelada com amplitudes variando entre 1 kA e 200 kA, com tempos de frente e cauda fixos em 2  $\mu$ s e 65  $\mu$ s, respectivamente. Conforme seções 2.2.3.3 e 2.2.3.4, as probabilidades de ocorrência das descargas descendentes negativas com amplitudes acima de um determinado valor podem ser estimada a partir da Equação 2.2 e visualizadas na Figura 3.1, e a probabilidade de ocorrência de taxas de crescimento de correntes superiores a uma taxa considerada pode ser estimada a partir da Equação 2.3, mostrada na Figura 3.2 para uma onda com tempo de frente de 2  $\mu$ s e amplitudes variando entre 1 kA e 200 kA.



**Figura 3.1.** Probabilidade da Corrente de Descarga Atmosférica ser excedida.

Todas as ondas de corrente foram injetadas no topo da torre central. Considerou-se que a torre atingida sempre terá um número par de torres em sua vizinhança. A Figura 3.3, ilustra uma situação com uma torre adjacente, ou seja, três torres no



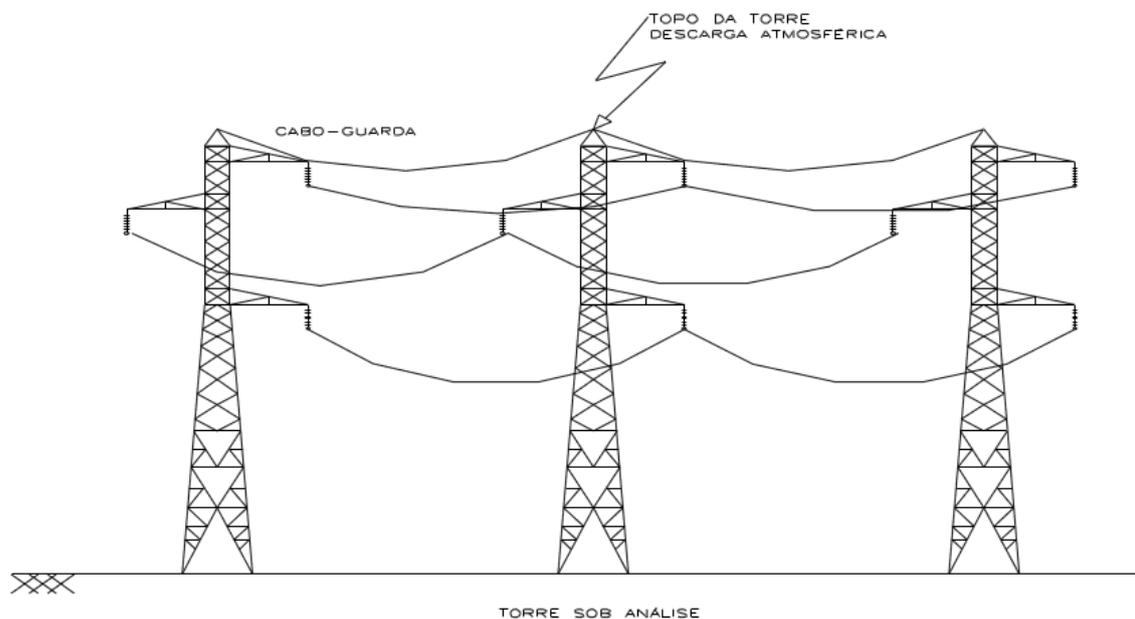
**Figura 3.2.** Probabilidade da Taxa de Crescimento (di/dt) ser excedida, para uma onda com tempo de frente de 2µs.

sistema, uma para cada lado da torre onde a descarga incide, onde ondas de corrente são injetadas no topo da torre central.

### 3.2.2 Linha de Transmissão

O estudo foi realizado para uma linha trifásica de 138 kV, circuito simples, 350 metros de vão entre torres, um cabo guarda e perfil da estrutura segundo a Figura 3.4. Os condutores considerados foram do tipo LINNET com uma flecha de 8 metros. O cabo guarda possui um diâmetro de 0,95 centímetros e 5,5 metros de flecha. Foi utilizado o modelo de linha polifásica tipo Bergeron disponibilizado pelo ATP, onde se considerou uma frequência de 5000 Hz e resistividade do solo de 1000  $\Omega\text{m}$  para o cálculo dos parâmetros da linha.

Para evitar reflexões nas terminações das linhas, foram consideradas, a partir da última torre adjacente, linhas de comprimento suficientemente elevado (50 km).



**Figura 3.3.** Desenho ilustrativo do ponto de incidência da descarga atmosférica. Situação com uma torre adjacente [Viana, 2009].

### 3.2.3 Torres

As torres foram representadas como linhas monofásicas sem perdas [Soares et al., 1997], modeladas através de parâmetros distribuídos. O ATP disponibiliza uma linha monofásica, com parâmetros distribuídos, impedância de surto e velocidade de propagação ou tempo de trânsito pré definidos. A velocidade de propagação adotada foi 80% da velocidade da luz ( $2,4 \times 10^8$  m/s) e a impedância de surto da torre ( $Z_t$ ) foi calculada segundo a Equação 3.1, de acordo com EPRI [1982]. Dessa forma, a impedância de surto das torres é de  $205 \Omega$ .

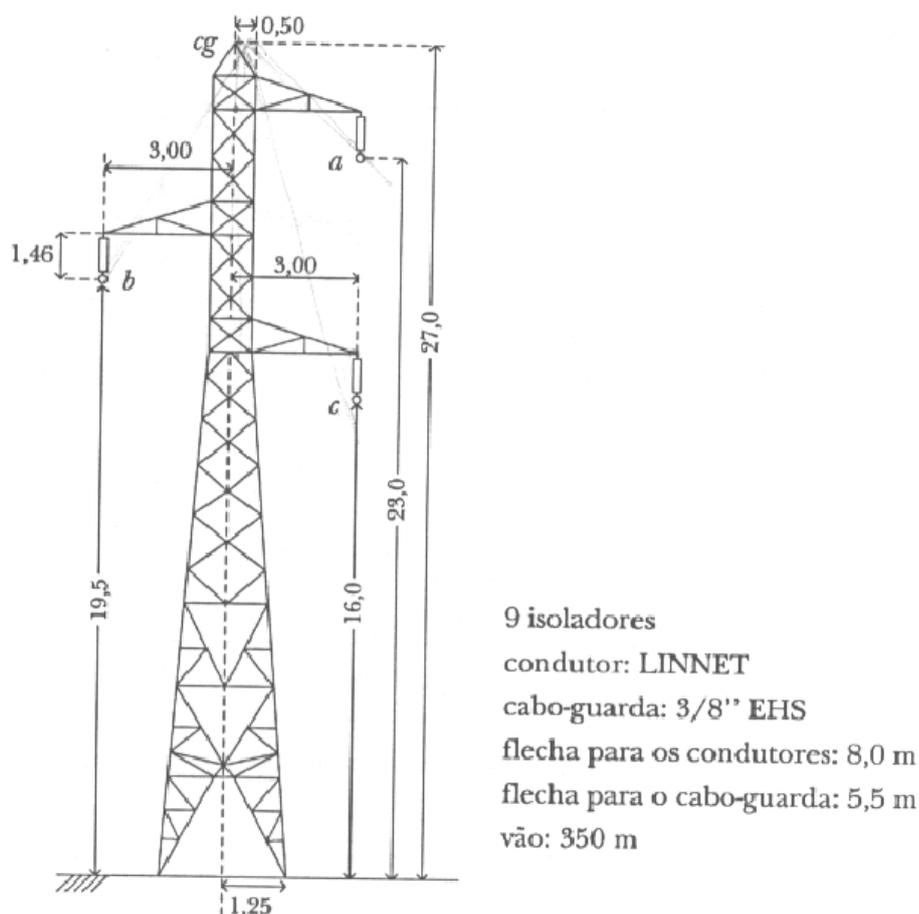
$$Z_t = 30 \ln \left[ \frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right], \quad (3.1)$$

onde:

$Z_t$  é a impedância de surto da torre em  $\Omega$ ;

$h$  é a altura da torre em metros;

$r$  é o raio do meio da torre em metros.



**Figura 3.4.** Geometria da torre de 138 kV, circuito simples, retirado de [Zanetta, 2003].

### 3.2.4 Impedância de Aterramento

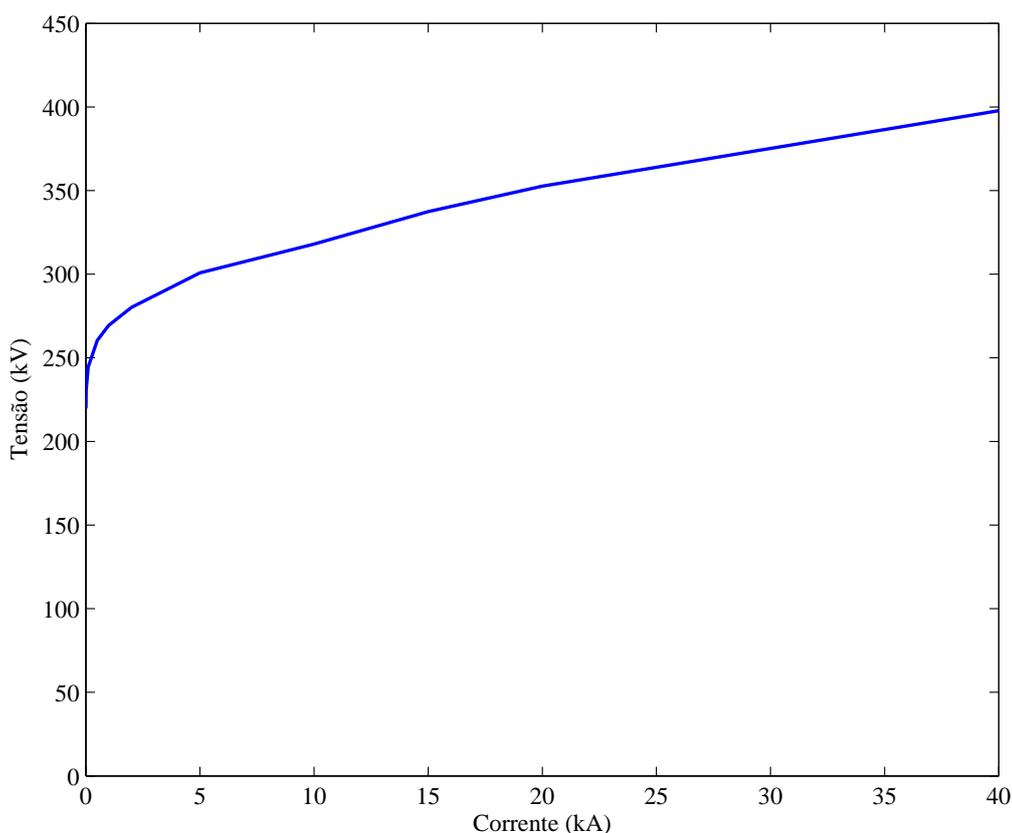
O sistema de aterramento foi modelado como resistências concentradas com valores iguais a 70% do valor da resistência de aterramento em baixa frequência, conforme apresentado em Soares et al. [1997] e Assis et al. [2012], devido à ionização do solo. As resistências analisadas variaram entre 14  $\Omega$  e 170  $\Omega$ , resultando em impedâncias de aterramento variáveis entre 10  $\Omega$  a 120  $\Omega$ , respectivamente.

### 3.2.5 Para-raios

Apesar dos modelos desenvolvidos pelo IEEE e pelo CIGRE, mostrados na seção 2.5.4 do capítulo 2, representarem mais fielmente os para-raios reais, estudos tem sido realizados considerando resistores não lineares com ótimos resultados, como o estudo realizado por Assis et al. [2012]. Dessa forma, neste trabalho, o para-raios foi modelado

como um elemento de resistência não linear com tensão de disparo de 0 kV, de forma a representar um para-raios de ZnO.

A modelagem do para-raios foi feita através da sua curva característica  $V \times I$ , exibida na Figura 3.5. Este para-raios possui uma tensão nominal de 120 kV, tensão máxima de operação contínua (MCOV) de 98 kV e capacidade de absorção de energia de 5,5 kJ/kV da MCOV (540 kJ). Foi escolhido por se tratar de um para-raios tradicionalmente instalado em sistema de transmissão de 138 kV.

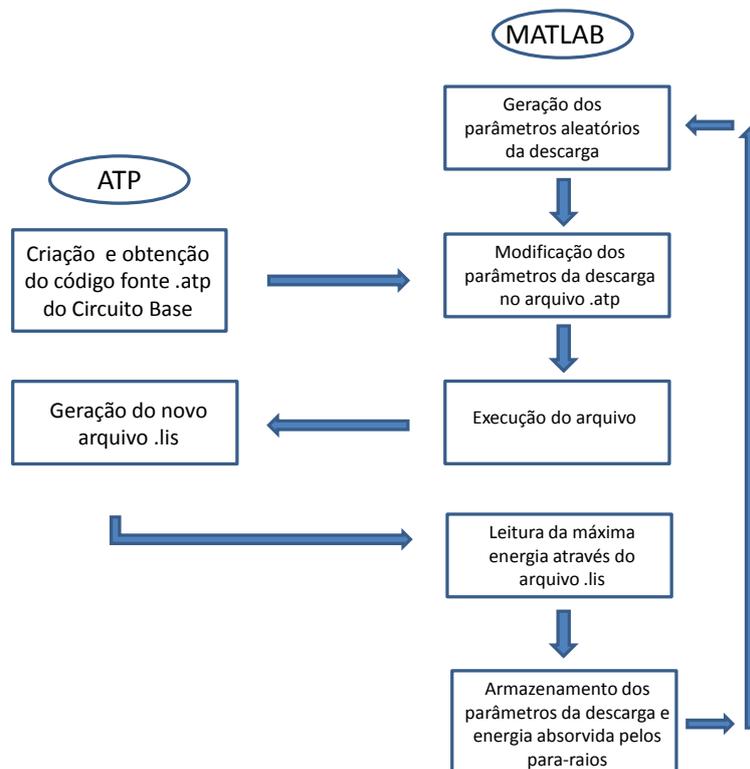


**Figura 3.5.** Curva  $V \times I$  do para-raios utilizado.

### 3.3 Programa para o cálculo da energia absorvida pelos para-raios de linha

As análises estatísticas foram realizadas de forma automática dentro do programa MATLAB, a partir de um caso base criado no ATP, conforme fluxograma da Figura 3.6, cujas etapas são descritas a seguir.

O programa ATP trabalha com um arquivo de entrada de dados em formato texto, geralmente com terminação .DAT (ou .ATP), que pode ser editado em qualquer editor de textos. Neste arquivo estão todas as informações dos elementos constituintes do caso a ser simulado, como por exemplo, os parâmetros da fonte de corrente do sistema. De um modo geral, o programa ATP lê este arquivo de dados e, após efetuar o processamento desse arquivo, gera outro arquivo geral com todo o estudo efetuado, com extensão .LIS. Também há a geração de um outro arquivo de saída com a extensão .PL4 para a visualização dos gráficos. Estes arquivos são gravados no computador de acordo com instruções previamente informadas no início da execução do processamento do caso. Para a interação entre MATLAB e ATP, é necessário o arquivo de entrada .ATP para a modificação e a execução dos novos casos a serem estudados e do arquivos de saída .LIS para a leitura dos resultados realizados.



**Figura 3.6.** Fluxograma descritivo das rotinas de interação entre os programas ATP e MATLAB.

### 3.3.1 Criação do Circuito Base

O circuito base foi criado no programa ATP, conforme Figura 3.7. O sistema modelado é composto de 5 torres adjacentes (11 torres no total) cujos elementos foram modelados de acordo com a seção 3.2 deste trabalho.

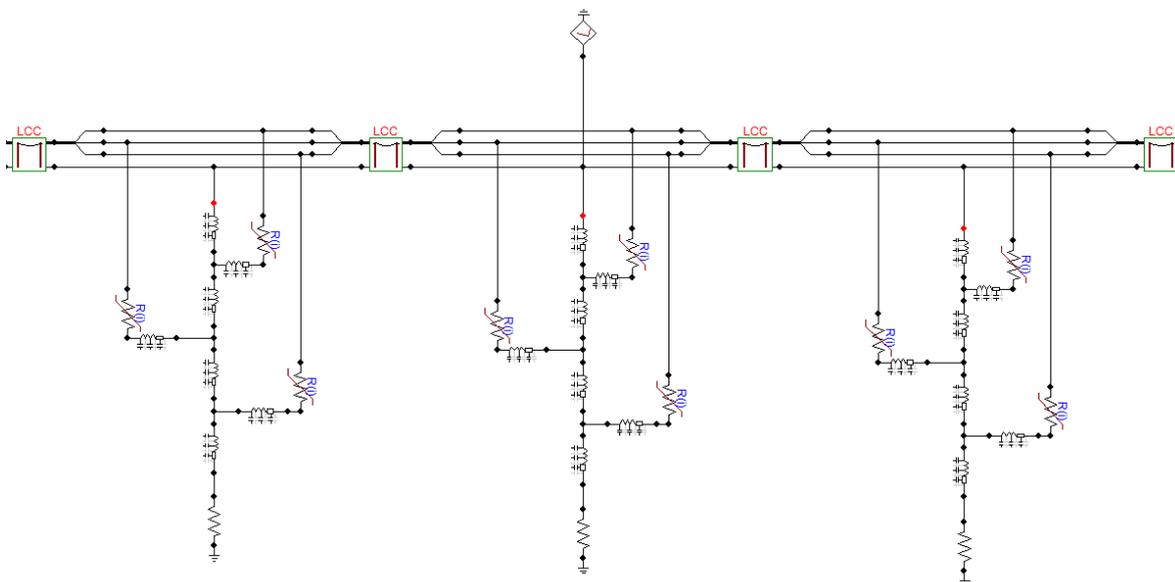


Figura 3.7. Parte do circuito base gerado no ATP.

Uma vez executado o circuito base no ATP, o arquivo com extensão .ATP, necessário para a execução automática no MATLAB, é gerado.

### 3.3.2 Geração dos Parâmetros da Onda de Descarga

O programa MATLAB foi utilizado para gerar os parâmetros da onda de corrente da descarga atmosférica. Foram geradas descargas com frente de onda e cauda fixas ( $2 \mu\text{s}$  e  $65 \mu\text{s}$ , respectivamente), mas de amplitudes variáveis. As amplitudes das descargas foram geradas de forma a cobrir um espectro completo de amplitudes que possam vir a incidir em um sistema de transmissão, conforme apresentado na Tabela 2.1. Foram simuladas, então, descargas com cristas entre 1 kA e 200 kA, em intervalos de 0,5 kA, num total de 400 descargas para cada caso executado.

### 3.3.3 Modificação dos Parâmetros da Descarga

A Figura 3.8 exibe uma parte do arquivo .ATP gerado a partir da execução do circuito base. A linha em destaque refere-se aos parâmetros da onda de corrente injetada no sistema, a qual deverá ser modificada.

```

/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><vf/CLOP >< type >
  XX00176                                     MEASURING 1
/SOURCE
C < n 1><< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
13XX0017-1 5.E4 2.E-6 2.5E4 6.5E-5 .000128
/OUTPUT
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

**Figura 3.8.** Parâmetros da descarga no arquivo .atp.

Através do desenvolvimento de uma rotina com os comandos "fopen", "fgetl" e "fwrite" do MATLAB, consegue-se chegar à posição exata da linha no arquivo .ATP onde se encontram os parâmetros da onda de corrente, alterá-los e salvar um novo arquivo .ATP com os novos parâmetros da onda de corrente da descarga atmosférica.

### 3.3.4 Execução do Arquivo

Após a modificação do arquivo .ATP descrito na seção 3.3.3, foi gerado um arquivo .BAT para execução automática, dentro do ambiente do MATLAB, conforme Figura 3.9.

```

runatp.exe C:\ATP\atpdraw\project\work\eriac.atp
del *.pl4 *.bin *.dbg *.asv *.pch

```

**Figura 3.9.** Comando usado para execução automática das simulações.

A primeira instrução executa o arquivo .ATP, no ambiente do programa ATP, gerado no estágio anterior. Durante as simulações alguns arquivos como .LIS, .PL4, .DBG, .BIN são gerados. Como o interesse está centrado no arquivo .LIS, a segunda instrução apaga os arquivos que não serão utilizados no processo. Por fim, este arquivo é executado no ambiente do MATLAB através do comando "DOS" disponível.

### 3.3.5 Leitura da Energia

O ATP gera dois arquivos de saída de dados, um com extensão .LIS e outro com extensão .PL4. Por ser um arquivo de texto e de fácil leitura através do MATLAB, neste trabalho foi utilizado o arquivo com extensão .LIS. Este arquivo possui uma linha específica, conforme mostra a Figura 3.10, onde se localizam as variáveis máximas das

saídas calculadas no ATP. Uma vez que o objetivo deste trabalho está centrado na máxima energia absorvida pelos para-raios, com uma rotina feita com os comandos "fopen" e "fgetl" do MATLAB, consegue-se chegar à posição exata da linha no arquivo .LIS onde se encontram os parâmetros máximos das variáveis de saída, ler os máximos valores de energia sobre os para-raios e armazená-los para futuros processamentos.

```

Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output.
Variable maxima : 553266.7 477130.979 519098.211 .280938E8 .5473076E8 .3700169E8 49999.992 4.2426078 10.9353472 6.96185663
Times of maxima : .2022E-5 .2052E-5 .2037E-5 .146E-5 .1511E-5 .1485E-5 .2E-5 .15E-3 .15E-3 .15E-3
Variable minima : -126595.01 -206724.92 -164238.34 0.0 -15059.877 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
Times of minima : .2667E-5 .2708E-5 .2686E-5 0.0 .3554E-5 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

Blank card terminating all plot cards. |BLANK PLOT
Actual List Sizes for the preceding solution follow. 29-Oct-12 15:29:29
Size 1-10: 131 169 15 1 703 1 165 52700 30 330
Size 11-20: 0 10 -9999 -9999 -9999 0 0 3 23 0
Size 21-30: 193 0 112 0 -9999 16 -9999 -9999 -9999 0
Seconds for overlays 1-5 : 0.062 0.000 0.062 -- (CP: wait; Real)
Seconds for overlays 6-11 : 0.000 0.000 0.000
Seconds for overlays 12-15 : 0.000 0.000 0.000
Seconds for time-step loop : 8.845 0.000 8.845
Seconds after DELTAT-loop : 0.000 0.000 0.000
-----
Totals : 8.908 0.000 8.908

```

Figura 3.10. Detalhes do arquivo de saída .lis.

## 3.4 Considerações Finais

Este capítulo abordou a modelagem dos elementos de uma linha de transmissão de 138 kV desenvolvida no programa computacional ATP. A onda de corrente da descarga atmosférica foi modelada através de uma onda triangular; a linha de transmissão foi modelada através de um modelo de linha polifásica com efeitos mútuos considerados; as torres foram modeladas por linhas de transmissão monofásicas sem perdas; os para-raios foram representados por elementos de resistência não linear e o aterramento das torres por resistências equivalentes concentradas. Também foi descrito o programa desenvolvido para o cômputo automático da energia absorvida pelos para-raios nas linhas de transmissão, através da interação entre os programas computacionais MATLAB e ATP. O Capítulo 4 apresenta os resultados e discussões sobre o estudo da energia absorvida pelos para-raios instalados em paralelo com as cadeias de isoladores de uma linha de transmissão de 138 kV, obtidos nas simulações de diversos casos encontrados em situações reais.

# Capítulo 4

## Resultados e Discussões

### 4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações e discussões a respeito da absorção de energia de para-raios de linhas instalados em linhas de transmissão de 138 kV, conforme modelagem apresentada no Capítulo 3. Primeiramente é feita a validação da modelagem através da comparação com exemplos disponíveis na literatura. Em seguida, é feita uma análise dos principais parâmetros da modelagem que influenciam no cômputo da energia dissipada pelos para-raios. Por fim, é realizada uma análise estatística, através da interação entre os programas computacionais MATLAB e ATP, da energia absorvida pelos para-raios de ZnO instalados nas linhas de transmissão.

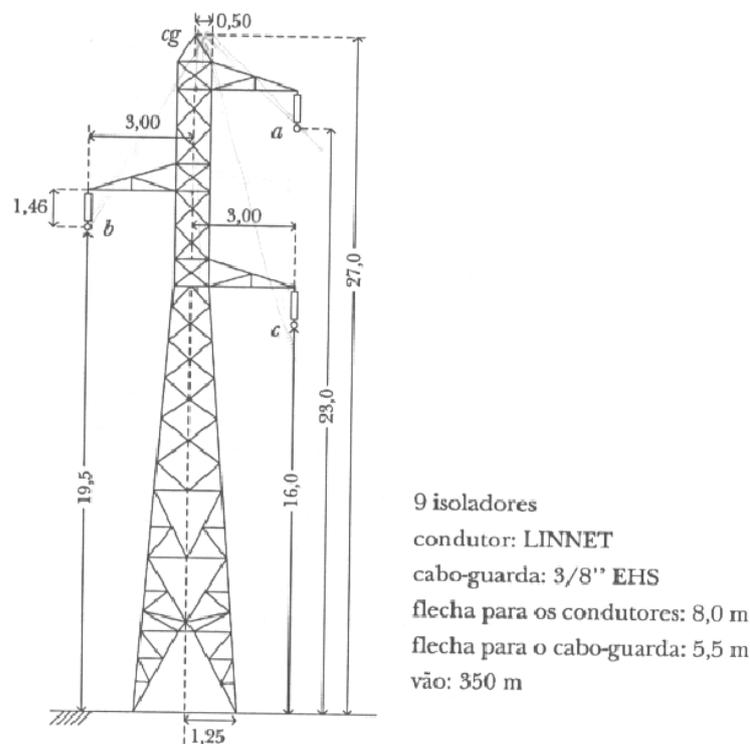
### 4.2 Validação da Modelagem

Para a validação do modelo proposto, foram reproduzidos alguns casos presentes nas referências [Viana, 2009] e [Zanetta, 2003]. Estes exemplos se referem à linha de transmissão descrita no Capítulo 3. A comparação dos resultados obtidos na modelagem do presente trabalho com os resultados dos exemplos permitiu a validação do modelo.

### 4.2.1 Sobretensão na Cadeia de Isoladores

A Figura 4.3 apresenta a tensão no braço da torre, na fase C (de acordo com Figura 4.1<sup>1</sup>) e na cadeia de isoladores quando uma onda de corrente de 20 kA de crista, 1  $\mu$ s de frente e 50  $\mu$ s de cauda, incide na torre central, conforme mostrado na Figura 4.2<sup>1</sup>, em um sistema composto por cinco torres adjacentes sem o uso de para-raios.

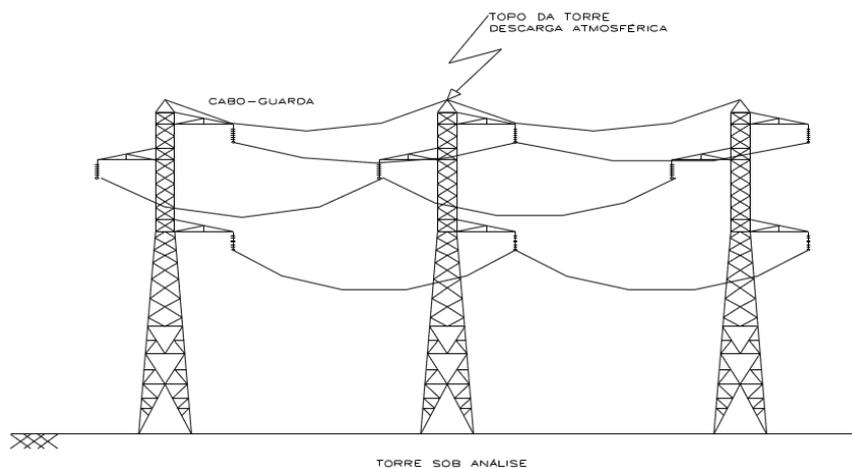
Comparando-se estes resultados obtidos nas simulações com os resultados encontrados na referência, apresentados na Figura 4.4, observa-se uma tensão máxima de 1,3 MV no braço da torre e uma sobretensão de aproximadamente 1 MV na cadeia de isoladores no tempo de 1  $\mu$ s e uma similaridade em todos os valores durante os 15  $\mu$ s de simulação.



**Figura 4.1.** Geometria da torre de 138 kV, circuito simples, retirado de [Zanetta, 2003].

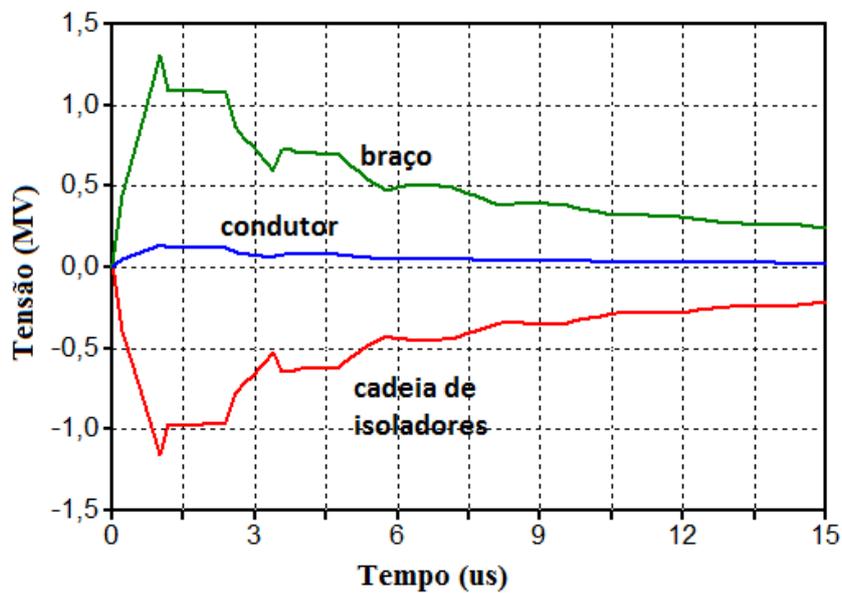
A Figura 4.5 apresenta a sobretensão na cadeia de isoladores das três fases (A, B e C), para a incidência da mesma onda de corrente no mesmo sistema descrito anteriormente. Observam-se, tanto nos resultados simulados quanto nos resultados encontrados na literatura, mostrados na Figura 4.6, amplitudes máximas de tensões

<sup>1</sup>Figuras do capítulo 3 reproduzidas novamente nesta seção para uma melhor compreensão do texto.

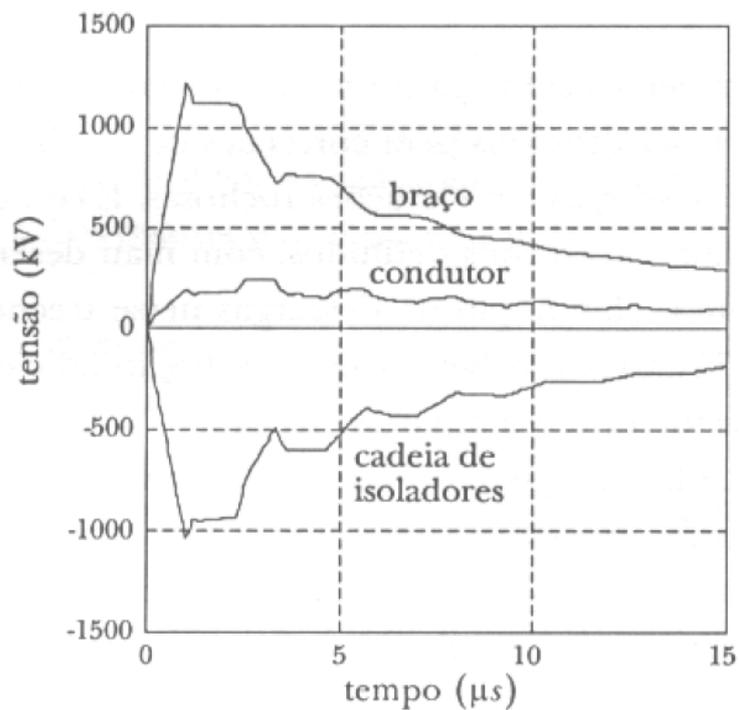


**Figura 4.2.** Desenho ilustrativo do ponto de incidência da descarga atmosférica. Situação com uma torre adjacente [Viana, 2009].

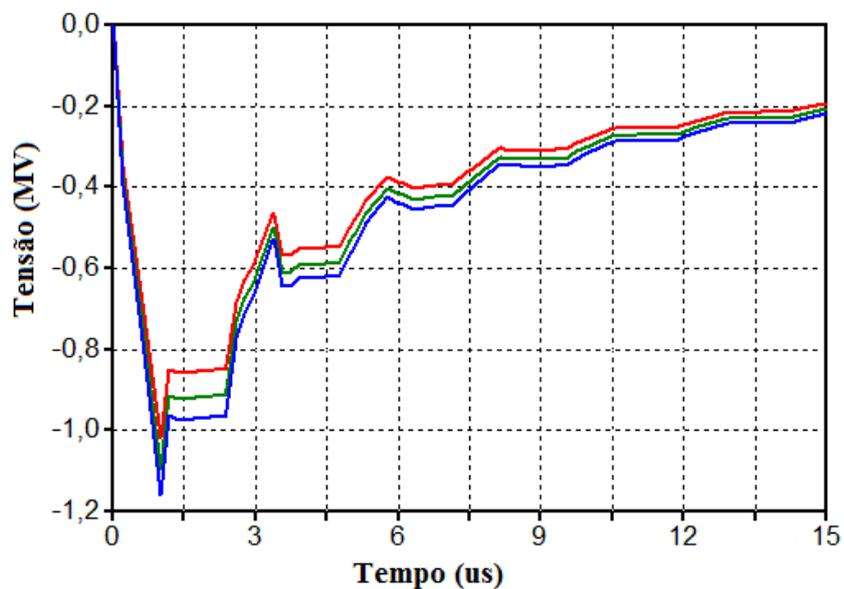
próximas a 1 MV na cadeia de isoladores de todas as fases e uma tensão de 200 kV no tempo de 15  $\mu$ s de simulação.



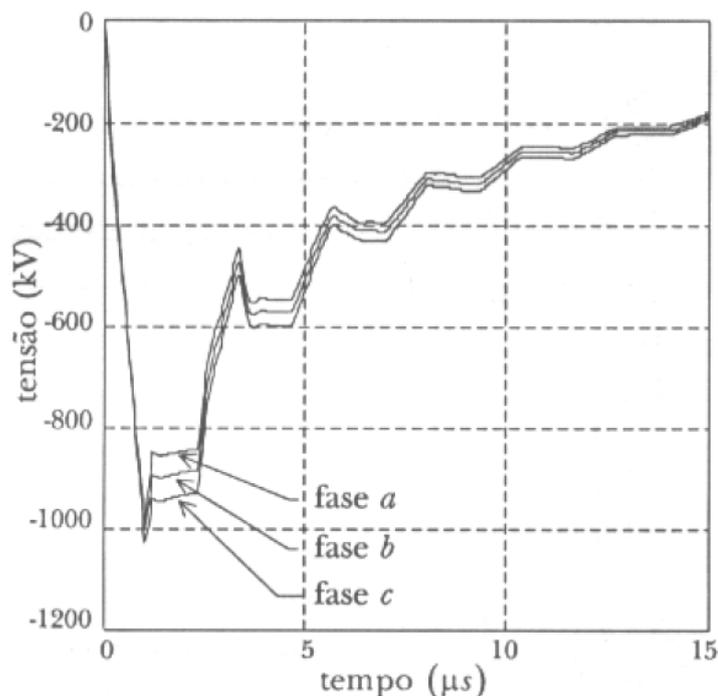
**Figura 4.3.** Tensão no braço da torre da fase C, na fase C e na cadeia de isoladores da fase C. Simulado no ATP.



**Figura 4.4.** Tensão no braço da torre da fase C, na fase C e na cadeia de isoladores da fase C. Retirado de [Zanetta, 2003].



**Figura 4.5.** Sobretensão na cadeia de isoladores das fases A, B e C. Simulado no ATP.



**Figura 4.6.** Sobretensão na cadeia de isoladores das fases A, B e C. Retirado de [Zanetta, 2003].

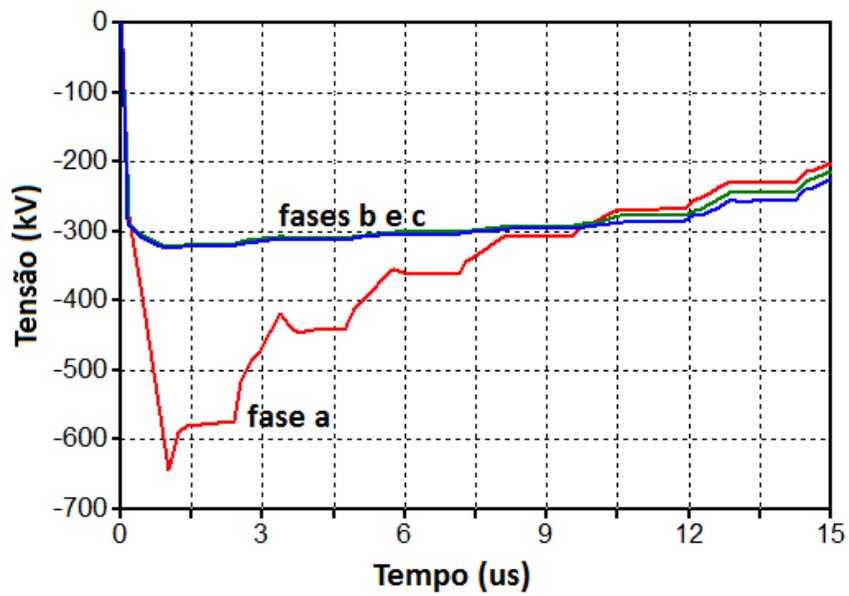
#### 4.2.2 Atuação do Para-raios

Considerando para-raios instalados nas fases B e C da linha, obtiveram-se as sobretensões nas cadeias de isoladores das três fases, conforme Figura 4.7. Comparando com o resultado da referência, mostrado na Figura 4.8, observa-se uma correspondência em ambos os resultados, uma vez que a máxima sobretensão na cadeia de isoladores da fase A é de 650 kV e nas fases B e C de 310 kV no resultado simulado e de 350 kV no resultado da referência, aproximadamente. Também, após os 15  $\mu$ s, as tensões de todas as fases são de 200 kV.

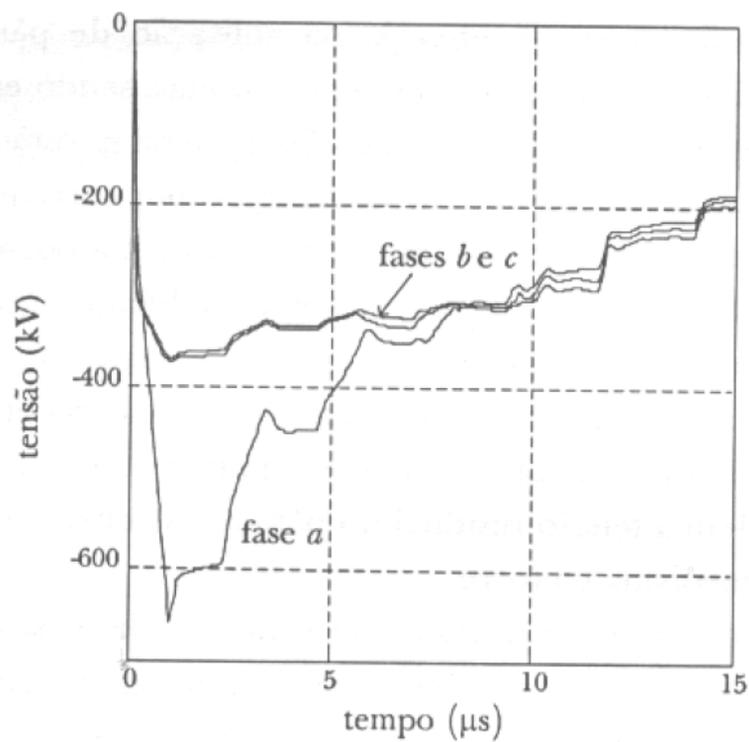
#### 4.2.3 Energia absorvida pelos Para-raios

O elemento não linear do programa ATP disponibiliza uma saída que fornece a potência e a energia, conforme Figura 4.9. Todos os resultados deste trabalho foram computados através desta saída.

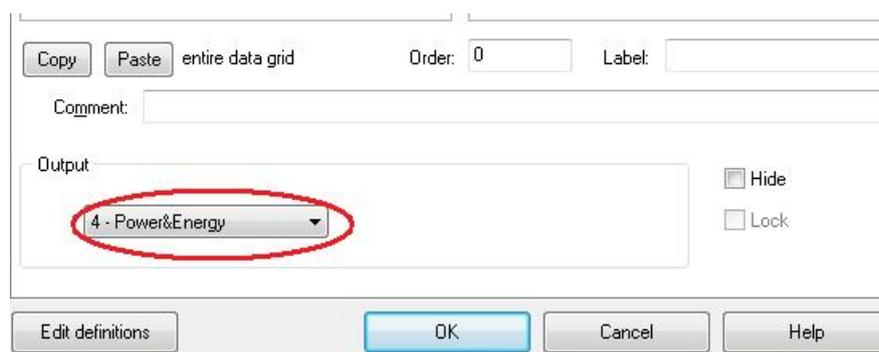
O cômputo da energia absorvida pelo para-raios foi, então, avaliado através de comparação de simulações da referência [Viana, 2009]. Foi considerado um sistema constituído por para-raios instalados apenas nas fases da torre onde uma onda de corrente de 31,5 kA, 1,2/50  $\mu$ s incide e variou-se o número de torres adjacentes do



**Figura 4.7.** Sobretensão na cadeia de isoladores de todas as fases com para-raios nas fases B e C. Simulado no ATP.



**Figura 4.8.** Sobretensão na cadeia de isoladores de todas as fases com para-raios nas fases B e C. Retirado de [Zanetta, 2003].



**Figura 4.9.** Janela de definição dos parâmetros do elemento de resistência não linear do ATP, destacando a saída habilitada para o cômputo de potência e energia do elemento.

sistema. A Tabela 4.1 mostra a máxima energia absorvida pelos para-raios em função do número de torres adjacentes que compõe o sistema modelado. A máxima energia está no para-raios da fase C pois, como mostra a Figura 4.1, é a fase com menor fator de acoplamento e, conseqüentemente, submetida ao maior nível de sobretensão. A máxima energia absorvida pelos para-raios, em ambos os casos, é de aproximadamente 23 kJ quando não se consideram torres adjacentes no modelo. Ao se considerar torres adjacentes, a energia absorvida pelos para-raios é reduzida, estabilizando-se em 4 kJ a partir da consideração de duas ou mais torres adjacentes no modelo simulado.

**Tabela 4.1.** Energia dissipada pelo Para-raios x Número de torres adjacentes.

Número de torres adjacentes	Máxima Energia dissipada pelos PR (kJ) - Simulação	Máxima Energia dissipada pelos PR (kJ) - Referência <sup>1</sup>
0	22,42	23,49
1	4,13	6,32
2	3,77	4,25
3	3,75	4,08
4	3,75	4,06
5	3,75	4,01

Portanto, observa-se que os para-raios são submetidos a níveis maiores de energia quando torres adjacentes são desconsideradas no modelo. Dessa forma, é necessária a consideração de torres adjacentes para o cômputo da energia. Nesta situação, duas torres adjacentes já são o suficiente para o cálculo da energia no para-raios uma vez que a máxima energia absorvida pelos para-raios se estabiliza no valor de 4 kJ aproximadamente, a partir da consideração de duas ou mais torres adjacentes.

As comparações efetuadas indicam apenas pequenas diferenças entre os resultados e valida a modelagem da LT proposta no presente trabalho, tanto para análise de sobretensões devidas às descargas atmosféricas quanto para a energia dissipada pelos para-raios. Tais diferenças são aceitáveis uma vez que o modelo da linha de transmissão, a forma de onda da descarga, a quantidade de torres adjacentes consideradas e o tipo de modelo do para-raios utilizado não são disponibilizados por Zanetta [2003]. Em Viana [2009], o modelo da linha utilizada, a tensão nominal e a curva  $V \times I$  do para-raios, também não estão disponíveis.

### 4.3 Análise de Sensibilidade: número de torres adjacentes consideradas na modelagem

Nesta seção, é avaliada a influência dos parâmetros da descarga atmosférica (intensidade e duração) e a resistência de aterramento das torres adjacentes no cálculo da energia absorvida pelos para-raios. A linha foi modelada segundo o Capítulo 3, no programa de cálculo de transitórios eletromagnéticos, ATP, com um tempo de simulação de 150  $\mu\text{s}$ . Foram consideradas duas situações: para-raios instalados em todas as fases da torre onde a descarga incidiu e para-raios em todas as fases de todas as torres do modelo. Foram consideradas torres com impedância de aterramento de 40  $\Omega$ .

As Tabelas 4.2 e 4.3 mostram a variação da máxima energia absorvida pelo para-raios instalado na fase C em função do número de torres consideradas na modelagem, na situação em que apenas a torre atingida possui para-raios em suas fases. Foi simulada uma descarga de 50 kA incidindo na torre central e variou-se o tempo de frente e de cauda da onda injetada. Na Tabela 4.2, a descarga injetada possui um tempo de frente de 1,5  $\mu\text{s}$  enquanto na Tabela 4.3, o tempo de frente da onda é de 30  $\mu\text{s}$ . A cauda foi variada em 10  $\mu\text{s}$ , 50  $\mu\text{s}$  e 250  $\mu\text{s}$  para a onda com tempo de frente de 1,5  $\mu\text{s}$  e em 50  $\mu\text{s}$  e 250  $\mu\text{s}$  para a onda com tempo de frente de 30  $\mu\text{s}$ .

Pode-se notar que, independentemente dos parâmetros da descarga, torres adjacentes consideradas na modelagem do sistema contribuem para uma redução da energia absorvida pelos para-raios. Duas torres adjacentes já são suficientes para computar a energia absorvida pelos para-raios. Ao se considerar um número maior de torres adjacentes, o valor da energia do para-raios não varia significativamente, estabilizando em aproximadamente 0,041 kJ/kV para a onda com cauda de 10  $\mu\text{s}$ , em 0,077 kJ/kV para a onda de 50  $\mu\text{s}$  de cauda e em 0,106 kJ/kV para a onda com cauda de 250  $\mu\text{s}$ . Existe uma redução brusca na energia quando se consideram na modelagem torres adjacentes, principalmente quando descargas com caudas mais longas são injetadas na linha. Por

**Tabela 4.2.** Máxima Energia absorvida pelos para-raios em função do número de torres do sistema (pico da descarga = 50 kA, tempo de frente = 1,5  $\mu$ s). Pr's apenas na torre atingida.

Nº de Torres	Tempo de cauda ( $\mu$ s)	Energia (kJ)	Energia (kJ/kV)
1	10	9,24	0,077
	50	48,78	0,407
	250	246,5	2,054
3	10	4,86	0,041
	50	11,74	0,098
	250	43,65	0,364
5	10	4,88	0,041
	50	9,33	0,078
	250	15,76	0,131
7	10	4,93	0,041
	50	9,22	0,077
	250	13,01	0,108
9	10	4,97	0,041
	50	9,22	0,077
	250	13,01	0,108
11	10	4,98	0,041
	50	9,22	0,077
	250	12,75	0,106

**Tabela 4.3.** Máxima Energia absorvida pelos para-raios em função do número de torres do sistema (pico da descarga = 50 kA, tempo de frente = 30  $\mu$ s). Pr's apenas na torre atingida.

Nº de Torres	Tempo de cauda ( $\mu$ s)	Energia (kJ)	Energia (kJ/kV)
1	50	34,62	0,289
	250	232,4	1,937
3	50	8,62	0,072
	250	39,89	0,332
5	50	6,73	0,056
	250	12,76	0,106
7	50	6,61	0,055
	250	9,83	0,082
9	50	6,64	0,055
	250	9,55	0,080
11	50	6,66	0,056
	250	9,51	0,079

exemplo, energias da ordem de 2,054 kJ/kV são reduzidas para 0,364 kJ/kV, ao se considerar uma corrente com 250  $\mu$ s de cauda e uma torre adjacente na modelagem.

As Tabelas 4.4 e 4.5 também mostram a máxima energia absorvida pelo para-raios instalados na fase C, em função do número de torres consideradas no modelo mas, injetando-se no sistema uma descarga de amplitude maior, 150 kA. Novamente, a cauda da onda foi variada em 10  $\mu$ s, 50  $\mu$ s e 250  $\mu$ s para uma onda com frente de 1,5  $\mu$ s e em 50  $\mu$ s e 250  $\mu$ s para a onda com frente de 30  $\mu$ s. Em ambas as tabelas, o comportamento é similar aos das Tabelas 4.2 e 4.3, ou seja, torres adjacentes contribuem para uma redução nos níveis de energia aos quais os para-raios são expostos e a maior redução ocorre ao se considerar uma torre adjacente no modelo. Para uma descarga de 150 kA, 1,5  $\mu$ s/250  $\mu$ s, a energia do para-raios diminui de 8,387 kJ/kV para 2,779 kJ/kV quando se considera uma torre adjacente no modelo.

**Tabela 4.4.** Máxima Energia absorvida pelos para-raios em função do número de torres do sistema (pico da descarga = 150 kA, tempo de frente = 1,5  $\mu$ s). Pr's apenas na torre atingida.

Nº de Torres	Tempo de cauda ( $\mu$ s)	Energia (kJ)	Energia (kJ/kV)
1	10	37,49	0,312
	50	198,95	1,658
	250	1006,4	8,387
3	10	23,49	0,196
	50	70,79	0,590
	250	333,44	2,779
5	10	25,16	0,210
	50	51,14	0,426
	250	181,74	1,515
7	10	25,67	0,214
	50	50,00	0,417
	250	128,21	1,068
9	10	25,99	0,217
	50	51,00	0,425
	250	107,9	0,899
11	10	26,00	0,217
	50	51,53	0,429
	250	100,93	0,841

É importante notar que a incidência de descargas com amplitudes mais elevadas e caudas mais longas implica na necessidade de se considerar um número maior de torres no modelo para o cômputo da energia absorvida pelos para-raios. Pelas Tabelas 4.4 e 4.5 verifica-se que para uma descarga de 150 kA, 1,5  $\mu$ s ou 30  $\mu$ s de tempo de frente e 250  $\mu$ s de tempo de cauda, a energia absorvida pelos para-raios somente se estabiliza

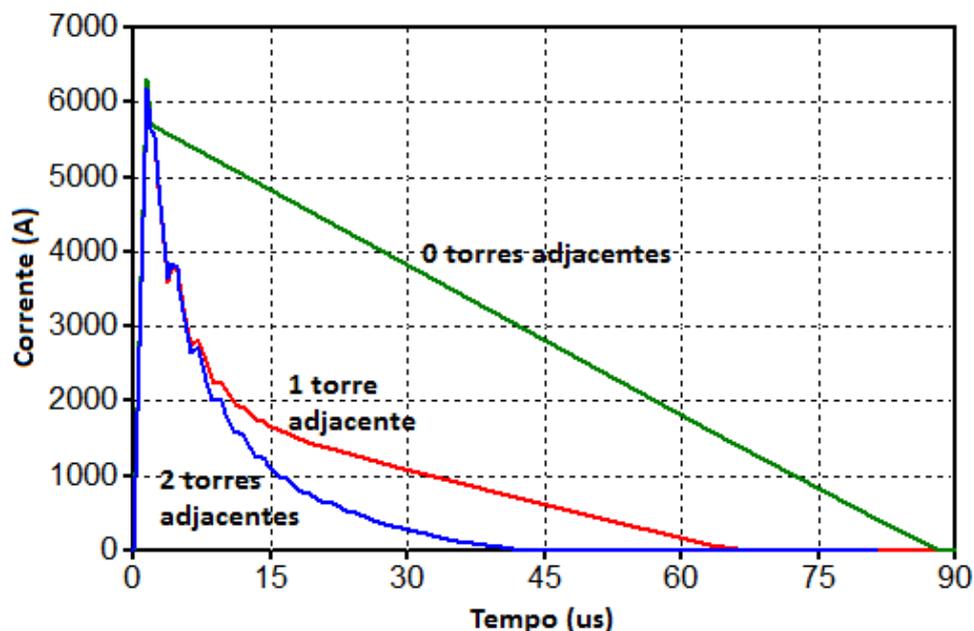
**Tabela 4.5.** Máxima Energia absorvida pelos para-raios em função do número de torres do sistema (pico da descarga = 150 kA, tempo de frente = 30  $\mu$ s). Pr's apenas na torre atingida.

Nº de Torres	Tempo de cauda ( $\mu$ s)	Energia (kJ)	Energia (kJ/kV)
1	50	141,33	1,178
	250	948,73	7,906
3	50	54,36	0,453
	250	313,68	2,614
5	50	48,49	0,404
	250	170,58	1,422
7	50	50,76	0,423
	250	120,44	1,004
9	50	51,78	0,432
	250	101,9	0,849
11	50	52,12	0,434
	250	95,8	0,798

em 0,8 kJ/kV a partir da consideração de quatro ou mais torres adjacentes no modelo. Diferente da situação apresentada nas figuras 4.2 e 4.3 em que duas torres adjacentes já seriam o suficiente para computar a energia absorvida pelos para-raios.

A Figura 4.10 apresenta as correntes drenadas pelos para-raios instalados na fase C, ao considerar-se o modelo sem nenhuma, com uma e com duas torres adjacentes, de forma a justificar a importância de se considerar torres adjacentes no modelo a ser simulado. Observa-se que torres adjacentes contribuem para uma redução da energia absorvida pelos para-raios. Uma vez que a área da curva da corrente drenada pelo para-raios é menor ao se considerar torres adjacentes no modelo, a curva de potência  $V \times I$  também será reduzida e, então, a energia calculada pela integral da curva da potência também será menor.

A Tabela 4.6 também apresenta a máxima energia dissipada pelo para-raios instalado na fase C da torre em função do número de torres considerado no sistema. A descarga simulada possui amplitude de 50 kA, tempo de frente de 1,5  $\mu$ s e tempo de cauda de 50  $\mu$ s. Duas situações foram consideradas: para-raios instalados em todas as fases da torre onde a descarga incidiu e para-raios em todas as fases de todas as torres do modelo. Verifica-se que, ao se considerar modelos com torres adjacentes, para-raios são submetidos a níveis maiores de energia se são instalados em todas as fases de todas as torres. Nota-se, também, que a energia absorvida pelos para-raios apresenta um acréscimo ao se aumentar o número de torres adjacentes do modelo e ao se considerar todas as fases de todas as torres com para-raios. Para essa onda de corrente injetada,



**Figura 4.10.** Corrente (kA) no para-raios instalado na fase C da torre onde uma descarga de 50 kA,  $1,5 \mu\text{s}/50 \mu\text{s}$  incide no seu topo. Sistema com para-raios apenas na torre atingida.

há um aumento na energia absorvida pelo para-raios de 0,11 kJ/kV para 0,17 kJ/kV ao aumentar o número de torres do modelo de 3 para 11.

Por fim, as Tabelas 4.7 e 4.8 mostram a influência que o valor da resistência de aterramento das torres adjacentes tem sobre a máxima energia absorvida pelos para-raios. Torres adjacentes com resistência de aterramento menor ( $12 \Omega$ ) do que a da torre onde a descarga incidiu ( $40 \Omega$ ) fazem com que a energia absorvida pelos para-raios seja menor quando comparada com o caso em que todas as torres possuem resistência uniforme ( $40 \Omega$ ). Torres adjacentes com resistência de aterramento maior ( $120 \Omega$ ) fazem com que os para-raios sejam submetidos a níveis mais altos de energia. Além do mais, nota-se que essa tendência é mais acentuada quando apenas a torre atingida possui para-raios em suas fases.

Tendo em vista todos os resultados apresentados nesta seção, verifica-se que a consideração de torres adjacentes no sistema a ser modelado é de fundamental importância para o cálculo da energia absorvida pelos para-raios. O número de torres adjacentes a serem consideradas na modelagem vai depender de diversos fatores, tais como os parâmetros da descarga atmosférica, a resistência de aterramento das torres e a disposição dos para-raios instalados nas linhas. Pelos resultados apresentados nesta seção, é necessário se considerar quatro ou cinco torres adjacentes no modelo (9 ou 11

**Tabela 4.6.** Máxima Energia absorvida pelos para-raios em função do número de torres do sistema (pico da descarga = 50 kA, tempo de frente = 1,5  $\mu$ s, tempo de cauda = 50  $\mu$ s).

Nº de Torres	Condição do Sistema	Energia (kJ)	Energia (kJ/kV)
1	Pr's apenas na torre atingida	48,78	0,407
	Pr's em todas as torres	48,78	0,407
3	Pr's apenas na torre atingida	11,74	0,098
	Pr's em todas as torres	13,24	0,110
5	Pr's apenas na torre atingida	9,33	0,078
	Pr's em todas as torres	16,18	0,135
7	Pr's apenas na torre atingida	9,22	0,077
	Pr's em todas as torres	18,24	0,152
9	Pr's apenas na torre atingida	9,22	0,077
	Pr's em todas as torres	19,34	0,161
11	Pr's apenas na torre atingida	9,22	0,077
	Pr's em todas as torres	19,86	0,166

**Tabela 4.7.** Máxima Energia absorvida pelos para-raios em função do número de torres do sistema (pico da descarga = 50 kA, tempo de frente = 1,5  $\mu$ s, tempo de cauda = 250  $\mu$ s). Para-raios instalado apenas na torre onde a descarga incide.

Nº de Torres	Impedância de Aterramento	Energia (kJ/kV)
1	40 $\Omega$ - todas as torres	2,054
	40 $\Omega$ - torre atingida e 12 $\Omega$ - torres adjacentes	2,054
	40 $\Omega$ - torre atingida e 120 $\Omega$ - torres adjacentes	2,054
3	40 $\Omega$ - todas as torres	0,364
	40 $\Omega$ - torre atingida e 12 $\Omega$ - torres adjacentes	0,076
	40 $\Omega$ - torre atingida e 120 $\Omega$ - torres adjacentes	1,053
5	40 $\Omega$ - todas as torres	0,131
	40 $\Omega$ - torre atingida e 12 $\Omega$ - torres adjacentes	0,073
	40 $\Omega$ - torre atingida e 120 $\Omega$ - torres adjacentes	0,611
7	40 $\Omega$ - todas as torres	0,108
	40 $\Omega$ - torre atingida e 12 $\Omega$ - torres adjacentes	0,073
	40 $\Omega$ - torre atingida e 120 $\Omega$ - torres adjacentes	0,394
9	40 $\Omega$ - todas as torres	0,107
	40 $\Omega$ - torre atingida e 12 $\Omega$ - torres adjacentes	0,073
	40 $\Omega$ - torre atingida e 120 $\Omega$ - torres adjacentes	0,286
11	40 $\Omega$ - todas as torres	0,106
	40 $\Omega$ - torre atingida e 12 $\Omega$ - torres adjacentes	0,073
	40 $\Omega$ - torre atingida e 120 $\Omega$ - torres adjacentes	0,235

**Tabela 4.8.** Máxima Energia absorvida pelos para-raios em função do número de torres do sistema (pico da descarga = 50 kA, tempo de frente = 1,5  $\mu$ s, tempo de cauda = 250  $\mu$ s). Para-raios instalado em todas as torres.

Nº de Torres	Impedância de Aterramento	Energia (kJ/kV)
1	40 $\Omega$ - todas as torres	2,054
	40 $\Omega$ - torre atingida e 12 $\Omega$ - torres adjacentes	2,054
	40 $\Omega$ - torre atingida e 120 $\Omega$ - torres adjacentes	2,054
3	40 $\Omega$ - todas as torres	0,257
	40 $\Omega$ - torre atingida e 12 $\Omega$ - torres adjacentes	0,554
	40 $\Omega$ - torre atingida e 120 $\Omega$ - torres adjacentes	1,053
5	40 $\Omega$ - todas as torres	0,187
	40 $\Omega$ - torre atingida e 12 $\Omega$ - torres adjacentes	0,171
	40 $\Omega$ - torre atingida e 120 $\Omega$ - torres adjacentes	0,367
7	40 $\Omega$ - todas as torres	0,198
	40 $\Omega$ - torre atingida e 12 $\Omega$ - torres adjacentes	0,174
	40 $\Omega$ - torre atingida e 120 $\Omega$ - torres adjacentes	0,295
9	40 $\Omega$ - todas as torres	0,211
	40 $\Omega$ - torre atingida e 12 $\Omega$ - torres adjacentes	0,073
	40 $\Omega$ - torre atingida e 120 $\Omega$ - torres adjacentes	0,297
11	40 $\Omega$ - todas as torres	0,219
	40 $\Omega$ - torre atingida e 12 $\Omega$ - torres adjacentes	0,179
	40 $\Omega$ - torre atingida e 120 $\Omega$ - torres adjacentes	0,309

torres no total) de forma a cobrir possivelmente todas as variações que podem acontecer na energia absorvida pelos para-raios (em função da variação dos parâmetros da descarga atmosférica e disposição de para-raios nas linhas, dentre outros), pois a partir desse número de torres, em todos os casos simulados, a energia do para-raios praticamente se estabilizou.

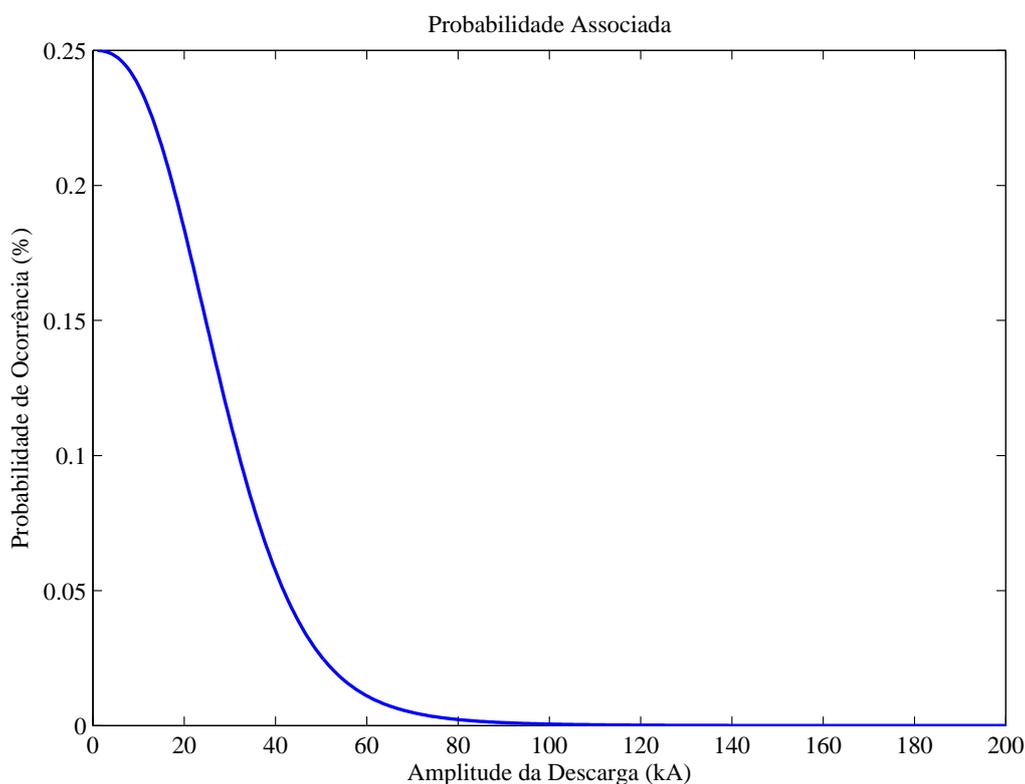
## 4.4 Análise Estatística de Energia

Nesta seção é avaliada, de forma estatística, a energia absorvida pelos para-raios quando da incidência de diferentes descargas sobre a linha de transmissão de 138 kV descrita no Capítulo 3. O estudo estatístico é realizado através da interação entre os programas MATLAB e ATP, conforme descrito na seção 3.3. Foram consideradas novamente as condições de instalação de para-raios isoladamente em uma estrutura atingida ou ao longo de todo o sistema. Avaliou-se, também, a influência da impedância de aterramento da torre atingida no montante de energia a que os para-raios são submetidos. Adicionalmente, analisou-se a sobretensão na cadeia de isoladores da torre

atingida sem para-raios, em um sistema composto por 11 torres, a fim de se verificar o limite da amplitude da descarga que não causa disrupção na cadeia de isoladores da torre atingida.

A amplitude da onda de corrente da descarga atmosférica foi variada entre 1 kA e 200 kA, de 0,5 kA em 0,5 kA, de forma a cobrir um espectro completo de amplitudes que possam incidir no sistema de transmissão. Os tempos de frente e cauda da onda foram mantidos constantes em 2  $\mu\text{s}$  e 65  $\mu\text{s}$ , respectivamente. As impedâncias de aterramento foram variadas entre 10  $\Omega$  e 80  $\Omega$ . Os para-raios utilizados, de tensão nominal de 120 kV, possuem capacidade de energia de 4,5 kJ/kV da tensão nominal (540 kJ).

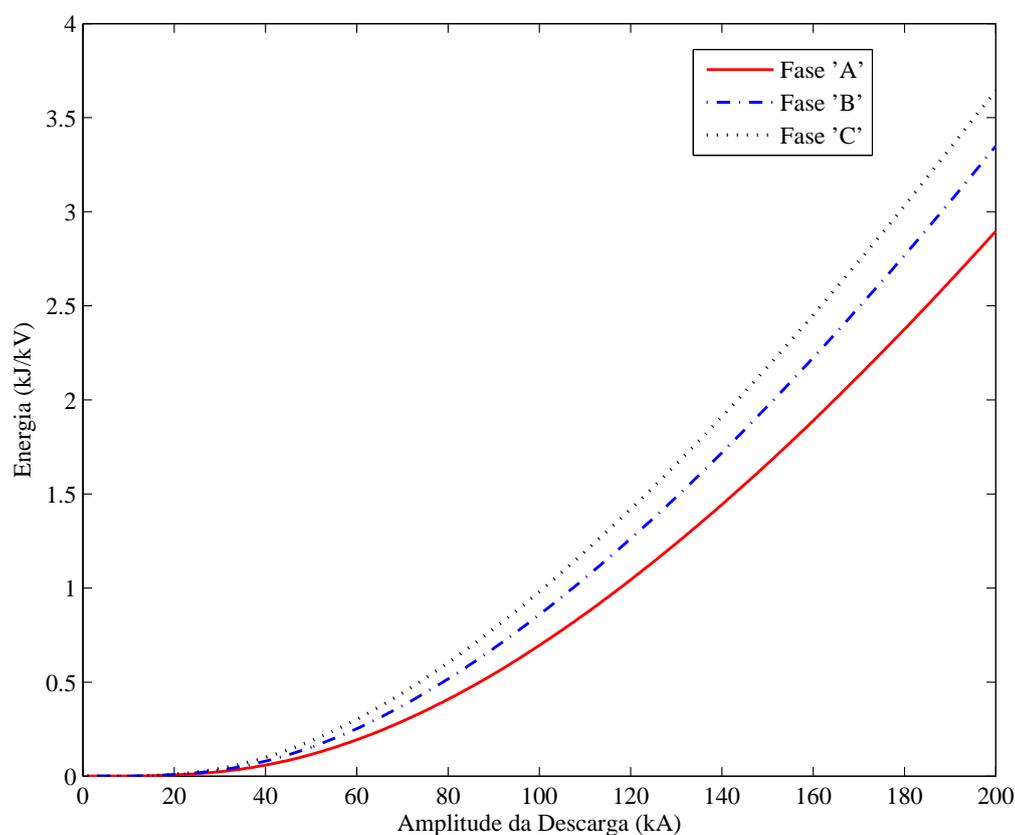
Para essa análise estatística, foi utilizada a curva da Figura 4.11, que exhibe a probabilidade de ocorrência da corrente de descarga atmosférica com um tempo de frente de 2  $\mu\text{s}$  ser excedida. Como foram simuladas 400 descargas, essa curva é obtida pela multiplicação das Equações 2.2 e 2.3 pelo fator de 0,0025, que corresponde a probabilidade de ocorrência de cada descarga simulada (1:400).



**Figura 4.11.** Probabilidade da Corrente de Descarga Atmosférica com uma Taxa de Crescimento ( $di/dt$ ) ser excedida, para uma onda com tempo de frente de 2  $\mu\text{s}$ .

### 4.4.1 Energia Absorvida

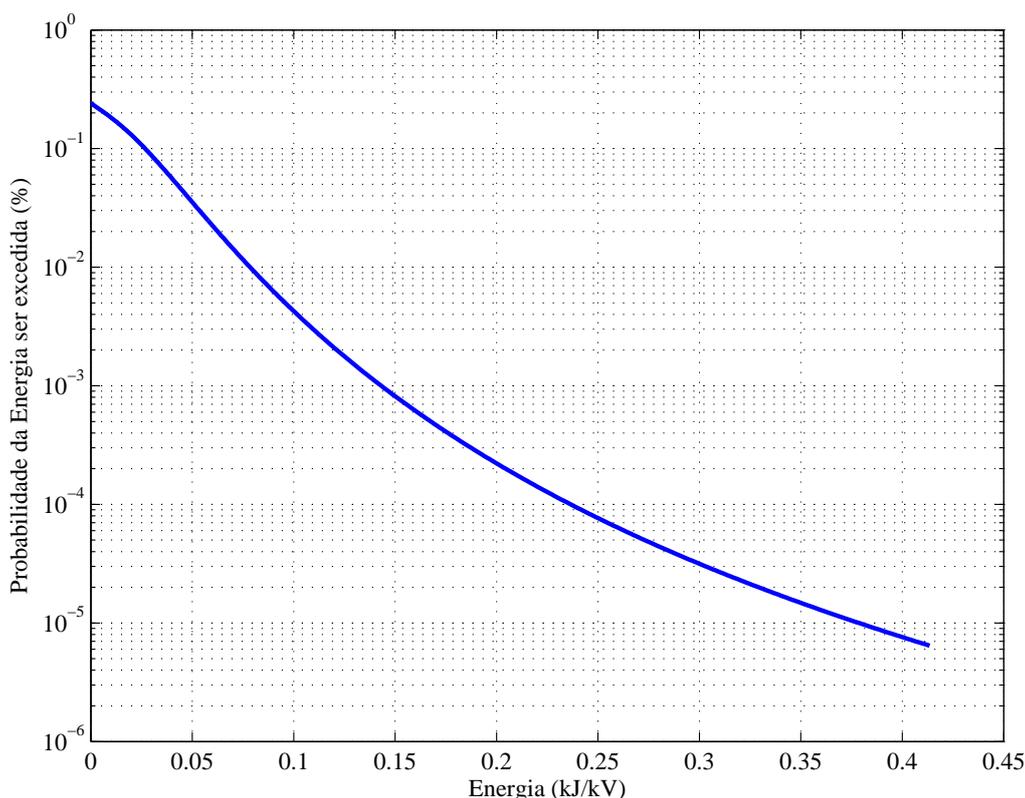
Os resultados apresentados ao longo desta análise relacionam-se ao para-raios mais estressado do sistema. A Figura 4.12 exibe a energia absorvida pelos para-raios instalados nas fases A, B e C da torre atingida em função da amplitude da descarga incidente, quando para-raios são instalados ao longo de todo o sistema. Verifica-se que o para-raios mais exigido é o para-raios instalado na fase C da torre atingida, fase esta que possui menor fator de acoplamento e, conseqüentemente, é submetida aos maiores níveis de sobretensão e energia.



**Figura 4.12.** Energia dissipada pelos PR's das fases A, B e C da torre atingida em função da amplitude da descarga incidente.  $Z = 50 \Omega$ . PR's nas fases de todas as torres.

As Figuras 4.13 e 4.14 apresentam a máxima energia absorvida pelo para-raios, kJ/kV da tensão nominal, em função da probabilidade dessa energia ser excedida. A Figura 4.13 refere-se ao sistema em que para-raios são instalados nas três fases apenas da torre atingida e a Figura 4.14, ao sistema com para-raios instalados em todas as fases

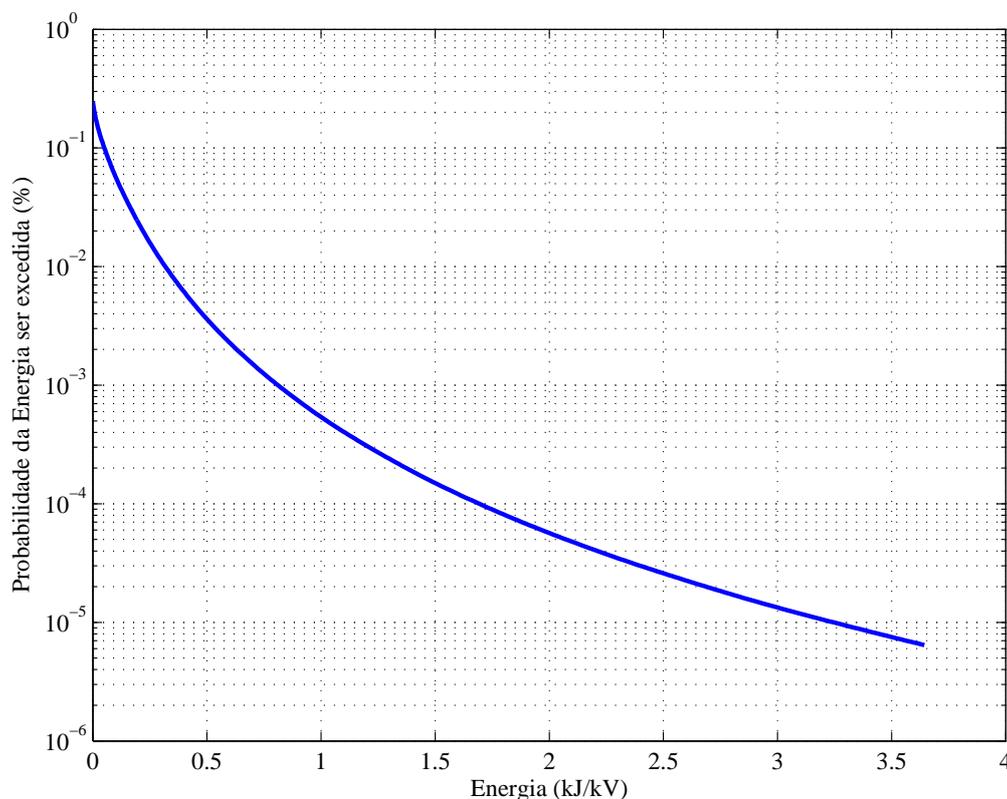
de todas as torres. A impedância de aterramento de todas as torres é de  $50 \Omega$ . Pode-se notar que quando os para-raios são instalados em todas as torres do sistema, eles são submetidos a níveis de energia mais altos comparados ao caso onde para-raios são instalados em apenas algumas estruturas. Verifica-se que os níveis mais altos de energia encontrados foram próximos a  $3,5 \text{ kJ/kV}$ . Este valor é cerca de  $78\%$  da capacidade de energia dos para-raios de linha classe 2, comumente instalados em linhas de  $138 \text{ kV}$ .



**Figura 4.13.** Máxima energia dissipada pelo PR em função da probabilidade de ser excedida. Para-raios instalados nas três fases apenas da torre atingida.  $Z = 50 \Omega$ .

Do ponto de vista de absorção de energia dos para-raios de linha, a situação mais crítica, ou seja, aquela que submete os para-raios a níveis mais altos de energia é a que para-raios são instalados em todas as fases de todas as torres. Dessa forma, os demais resultados desta seção 4.4.1 referem-se a esta situação, uma vez que, se nesta situação os para-raios não forem estressados além do limite da sua capacidade, nas outras situações de instalação, também não serão.

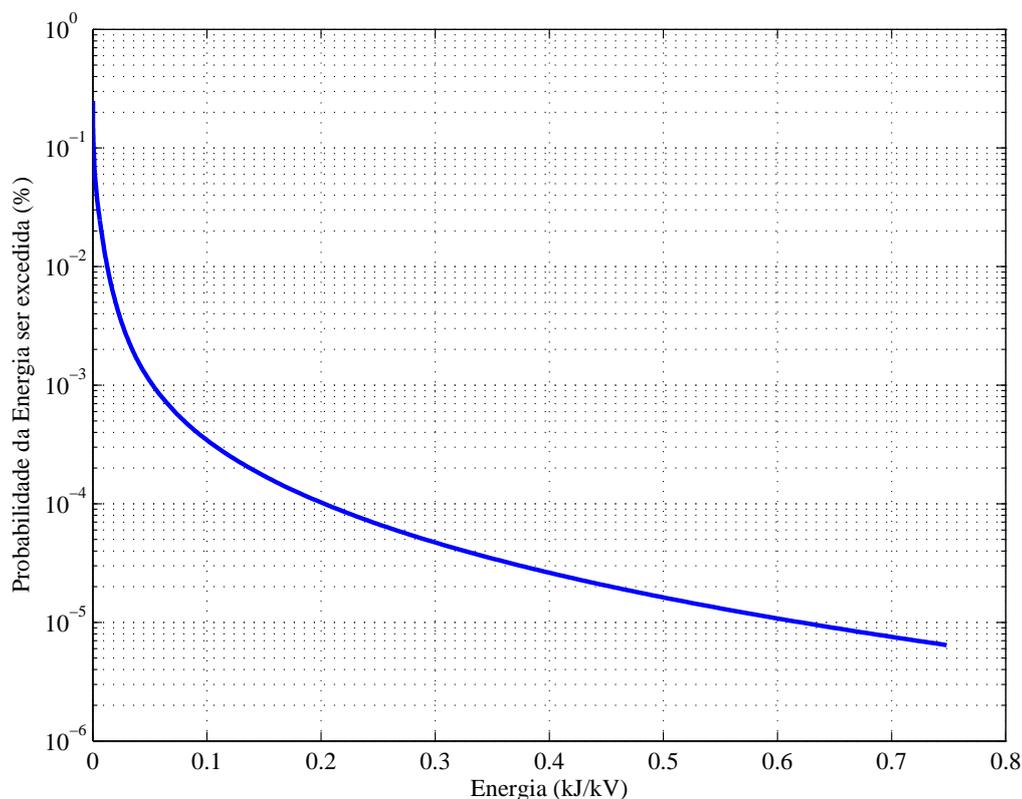
As Figuras 4.15 e 4.16 mostram a máxima energia absorvida pelo para-raios,  $\text{kJ/kV}$  da tensão nominal, em função da probabilidade dessa energia ser excedida,



**Figura 4.14.** Máxima energia dissipada pelo PR em função da probabilidade de ser excedida. Para-raios instalados nas três fases de todas as torres.  $Z = 50 \Omega$ .

mas variando-se a impedância de aterramento da torre onde a descarga incide. A Figura 4.15 exhibe os resultados para torre com impedância de aterramento de  $10 \Omega$  e a Figura 4.16 para torre com  $80 \Omega$  de impedância de aterramento. Observa-se que um aumento de 5 vezes na impedância de aterramento, leva a um aumento da mesma ordem na máxima energia absorvida pelo para-raios ( $0,7 \text{ kJ/kV}$  para  $3,5 \text{ kJ/kV}$ ) e um aumento de 8 vezes na impedância de aterramento, eleva em 6 vezes a máxima energia absorvida ( $0,7 \text{ kJ/kV}$  para  $4,2 \text{ kJ/kV}$ ). Apesar da energia absorvida pelo para-raios ser maior quando a impedância de aterramento da torre atingida aumenta, o para-raios classe 2 se apresenta bem dimensionado, visto que apenas poucas descargas simuladas e, estas, com baixa probabilidade de ocorrência, submetem-os a níveis máximos de energia (entre  $3,5$  e  $4,2 \text{ kJ/kV}$  da tensão nominal) e a capacidade de energia de uma para-raios Classe 2 é de  $4,5 \text{ kJ/kV}$  da tensão nominal.

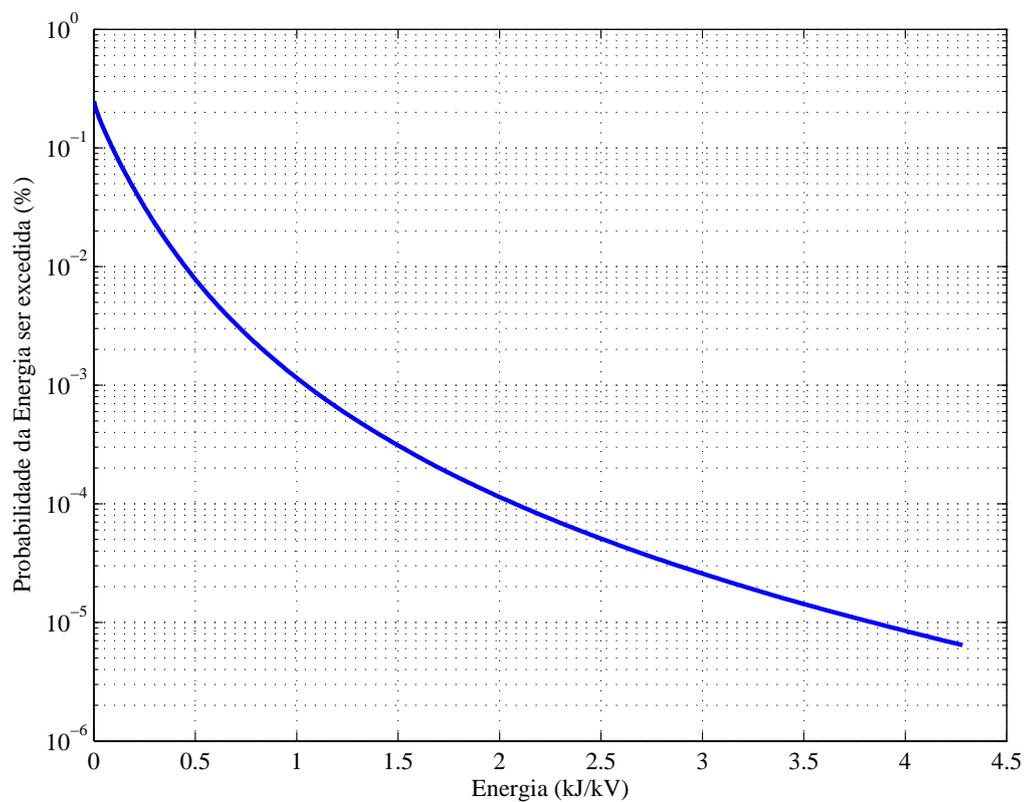
Por fim, as Figuras 4.17 e 4.18 apresentam a máxima energia absorvida pelo para-raios, kJ/kV da tensão nominal, em função da probabilidade dessa energia ser excedida, para diferentes condições de aterramento. A Figura 4.17 refere-se a um



**Figura 4.15.** Máxima energia dissipada pelo PR em função da probabilidade de ser excedida. Torres com  $Z = 10 \Omega$ .

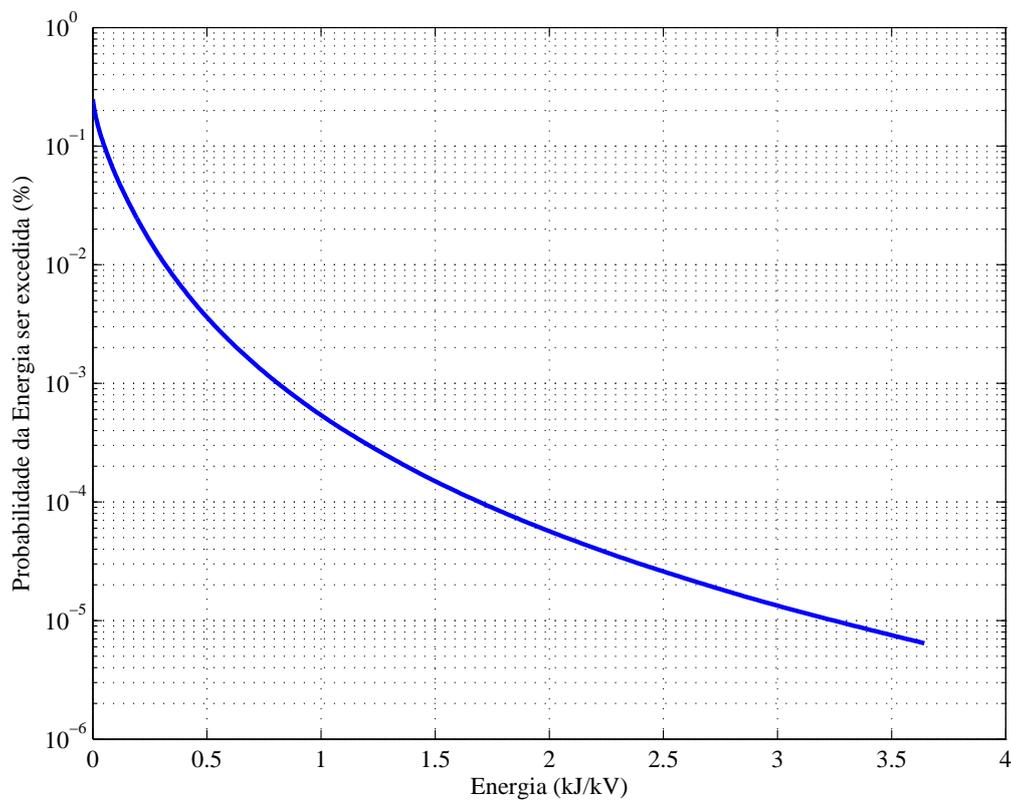
sistema com impedância de aterramento de  $50 \Omega$  em todas as torres e a Figura 4.18 refere-se a um sistema onde a torre atingida possui uma impedância de aterramento de  $50 \Omega$  e as demais torres,  $10 \Omega$  de impedância de aterramento. Observa-se que o valor da impedância de aterramento das torres adjacentes não influencia significativamente no montante de energia a que os para-raios são submetidos, uma vez que ambas as situações são bastantes similares.

Considera-se então uma linha de 138 kV de 100 km de extensão, efetivamente blindada com pr's instalados em todas as fases de todas as torres, com aterramentos de  $50 \Omega$ , localizada em uma região com densidade de descargas para terra de 7 descargas/ $km^2$ /ano. O número total de descargas incidentes nesta linha anualmente é de 104 [EPRI, 1982]. Considerando que os pr's são de classe 1 (capacidade de energia de 2,1 kJ/kV), observa-se que é necessário uma descarga com amplitude igual ou superior a 147 kA para que esta energia seja excedida (Figura 4.12). Então, a probabilidade do valor 2,1 kJ/kV ser excedido será de 0,000048 %. Assim, considerando o número de descargas anuais incidentes na linha, tem-se que a energia absorvida pelo pr Classe

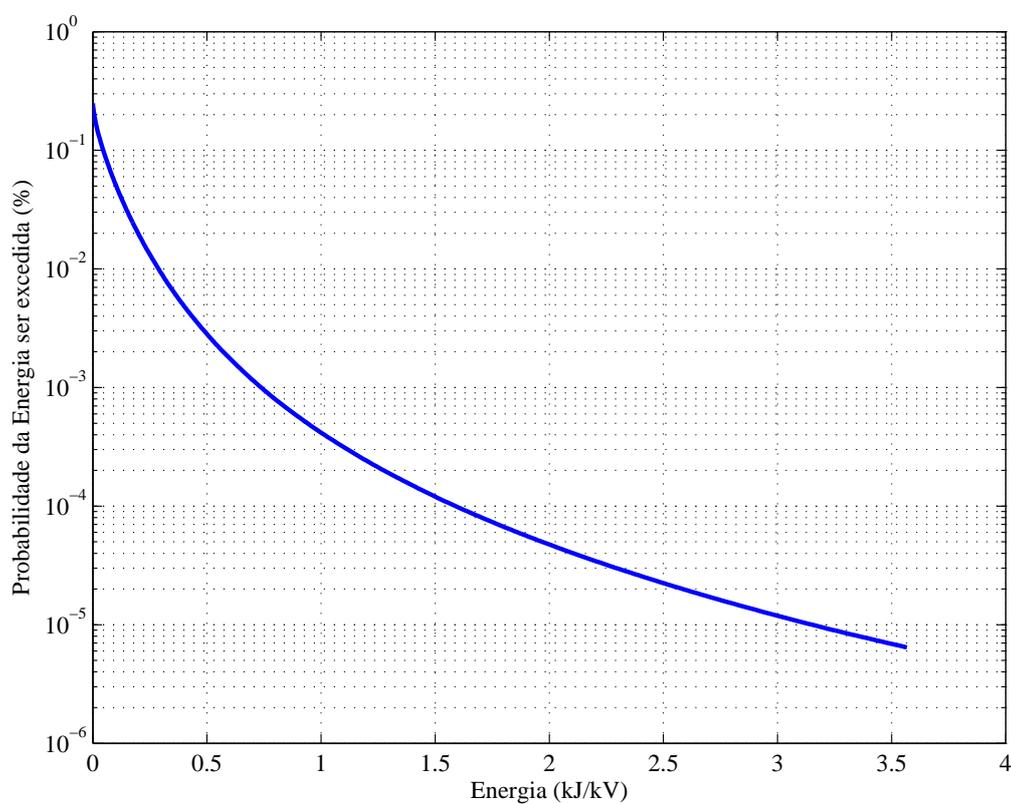


**Figura 4.16.** Máxima energia dissipada pelo PR em função da probabilidade de ser excedida. Torres com  $Z = 80 \Omega$ .

1 só será ultrapassada a cada 20000 anos. Este resultado indica a possibilidade de instalação de para-raios Classe 1 nas linhas de 138 kV nos casos de backflashovers.



**Figura 4.17.** Máxima energia dissipada pelo PR em função da probabilidade de ser excedida. Torres com  $Z = 50 \Omega$ .



**Figura 4.18.** Máxima energia dissipada pelo PR em função da probabilidade de ser excedida. Torres adjacentes com  $Z = 10 \Omega$  e torre central com  $Z = 50 \Omega$ .

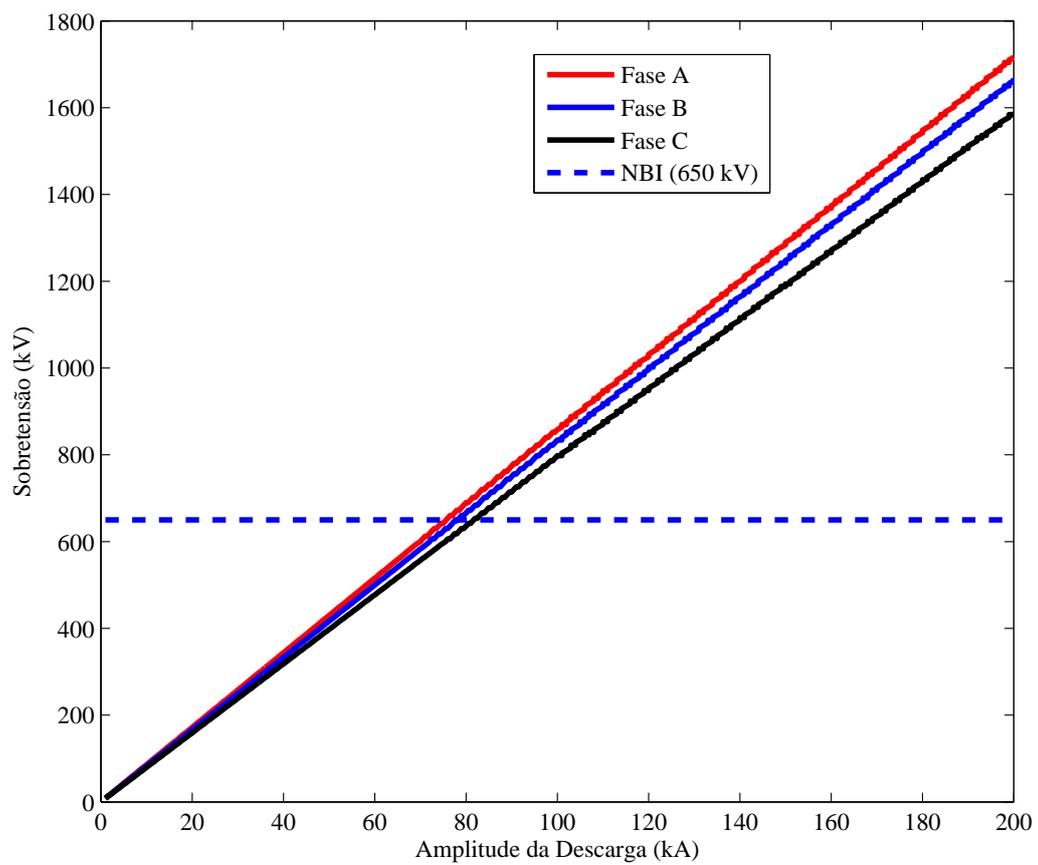
### 4.4.2 Sobretensão na Cadeia de Isoladores

Para descargas com forma de onda 2/65  $\mu\text{s}$  utilizadas neste estudo, diferentes valores de amplitude não estressam demasiadamente os para-raios do tipo Classe 2 habitualmente instalados nas linhas de transmissão de 138 kV. Os níveis de energia a que esses para-raios são submetidos são menores do que sua capacidade de energia. Tendo em vista esse resultado, foi realizado um estudo adicional no qual procurou-se avaliar as sobretensões que torres sem para-raios são submetidas quando atingidas por uma descarga atmosférica. Essa situação exemplifica casos práticos onde são instalados para-raios apenas nas torres mais críticas ou seja, aquelas com maiores valores de impedâncias de aterramento.

Foi simulado então, um caso em que apenas a torre atingida não possui para-raios instalados em suas fases. A impedância de aterramento dessa torre é de 10  $\Omega$  e das torres adjacentes é 50  $\Omega$ .

A Figura 4.19 mostra a máxima sobretensão desenvolvida nas fases da torre sem para-raios em função da amplitude da descarga incidente, para descargas variando de 1 kA a 200 kA com tempo de frente de 2  $\mu\text{s}$ . Nota-se que descargas atmosféricas com amplitude superior a 76 kA submetem a cadeia de isoladores a níveis de tensão maiores que o nível de isolamento básico de uma cadeia de isoladores de uma linha de 138 kV (NBI = 650 kV). Descargas dessa intensidade possuem uma probabilidade de 1,2% de serem excedidas, segundo Figura 4.11. O que representa uma probabilidade baixa de possíveis disrupções das cadeias de isoladores desta torre.

Se 100 descargas atmosféricas atingirem essa torre que não possui para-raios em suas fases, em apenas 1 das 100 vezes ocorrerá a disrupção da cadeia de isoladores desta torre, implicando, dessa forma, em 1 desligamento desta linha.



**Figura 4.19.** Máxima sobretensão na cadeia de isoladores das fases A, B e C da torre atingida em função da amplitude da descarga atmosférica.

## 4.5 Considerações Finais

Neste capítulo foi mostrado que a modelagem dos elementos da linha de transmissão, assim como os parâmetros da onda de corrente da descarga atmosférica incidente no sistema influenciam significativamente no cômputo da energia dos para-raios instalados ao longo das linhas. A não consideração de torres adjacentes no modelo simulado leva a um resultado bastante impreciso na energia absorvida pelos para-raios, uma vez que torres adjacentes contribuem para uma redução da energia absorvida por eles. A forma de onda da descarga incidente e a disposição dos para-raios nas linhas exercem grande influência na quantidade de torres adjacentes que devem ser consideradas na modelagem. Embora ondas com amplitudes mais elevadas e caudas mais longas e um sistema com para-raios em todas as fases de todas as torres impliquem na necessidade de se considerar um número maior de torres adjacentes no modelo, a consideração de 4 ou 5 torres adjacentes no modelo (9 ou 11 torres no total), é suficiente para cobrir todo o espectro de parâmetros das descargas atmosféricas, das ondas de corrente consideradas nas simulações realizadas.

Especificamente quanto à energia absorvida pelos para-raios instalados ao longo das linhas de transmissão de 138 kV, foi observado que, para os parâmetros típicos de corrente de descarga considerados, independentemente da forma da onda de corrente da descarga atmosférica, do valor da impedância de aterramento das torres e, também, da disposição dos para-raios nas linhas de transmissão, a energia dissipada pelos para-raios sempre é menor que a capacidade de energia dos para-raios habitualmente instalados nas linhas de 138 kV (4,5 kJ/kV da tensão nominal do para-raios - Classe 2), para os casos de backflashover analisados. Os resultados apresentados na seção 4.4, apontam que apenas nas situações em que para-raios são instalados em todas as fases de todas as torres, os para-raios são submetidos a níveis de energia superiores a 2,1 kJ/kV, nível este que representa a capacidade de energia de um para-raios Classe 1. Quando as torres possuem impedâncias de aterramento de 50  $\Omega$ , as amplitudes das descargas que levam os para-raios a absorverem energias superiores a 2,1 kJ/kV são superiores a 147 kA. Descargas com estas amplitudes levam a probabilidade de  $4,8 \times 10^{-5}$  % de energias de 2,1 kJ/kV serem excedidas. Em sistemas constituídos por torres com impedância de aterramento de 80  $\Omega$ , as descargas que fazem com que os para-raios dissipem energia superior a 2,1 kJ/kV são superiores a 132 kA e resultam em uma probabilidade de  $9,71 \times 10^{-5}$  % de excederem energias de 2,1 kJ/kV. Esse resultado indica uma probabilidade remota de energias superiores a 2,1 kJ/kV serem dissipadas pelos para-raios instalados nas linhas de transmissão de 138 kV e nos leva a supor que as linhas de 138 kV poderiam ser protegidas por para-raios Classe 1, para os casos de backflashovers.

Embora para-raios do tipo Classe 1 não sejam comercialmente fabricados para linhas de 138 kV, se fossem, haveria uma redução no custo do projeto de proteção das linhas de transmissão, uma vez que, para linhas com tensão de operação menor (sistema de 25 kV), a diferença de custo unitário de um para-raios Classe 2 para um para-raios Classe 1 é da ordem de 2 vezes.

## Capítulo 5

# Conclusões e Trabalhos Futuros

Para-raios de ZnO instalados em paralelo com a cadeia de isoladores das linhas de transmissão tem sido uma solução muito utilizada recentemente para a melhoria de desempenho das linhas frente a descargas atmosféricas. O grande inconveniente desta solução ainda está no seu custo. O preço unitário dos para-raios se torna maior, quanto maior a sua capacidade de energia. Devido a isso, é necessário que se faça um estudo preliminar antes de sua instalação, para que se possa definir corretamente a classe de para-raios que deve ser instalado numa determinada linha de transmissão, resultando assim em um projeto de proteção economicamente viável. Para este estudo preliminar, programas de cálculos de transitórios eletromagnéticos (ATP, PSCAD, Sigma Slp, etc) são geralmente utilizados. O grande problema é que existem diversas maneiras de se modelar os elementos de um sistema de transmissão nestes programas e dependendo da forma como se modela estes elementos, podem-se chegar a resultados imprecisos e, dessa forma, subdimensionar ou sobredimensionar os para-raios. Com base neste contexto, neste trabalho foi analisada a influência dos parâmetros da descarga atmosférica (tempo de frente, tempo de cauda e amplitude da corrente de descarga), assim como a modelagem dos elementos da linha de transmissão sobre o cálculo da energia absorvida pelos para-raios de ZnO instalados ao longo de uma linha de transmissão de 138 kV, circuito simples. Também foi avaliada, de forma estatística, a energia dissipada por estes para-raios quando da incidência de descargas atmosféricas. Foram consideradas as condições de instalação de para-raios isoladamente na estrutura atingida ou ao longo de todo o sistema.

Os resultados obtidos mostram que, assim como a resistência de aterramento, os parâmetros da descarga atmosférica e o número de torres adjacentes consideradas na modelagem da linha de transmissão influenciam bastante no montante de energia a que os para-raios são submetidos. Descargas com frentes mais rápidas e caudas mais

longas levam a uma maior necessidade de absorção de energia do para-raios.

Quando para-raios não são instalados em todas as torres, apenas nas fases da torre atingida, o cômputo da energia do para-raios pode ser feito considerando apenas duas torres adjacentes no modelo. Um número maior de torres adjacentes não contribui significativamente no montante de energia do para-raios. Já para sistemas com para-raios instalados em todas as torres é necessária uma análise mais detalhada. Descargas atmosféricas de amplitude elevada e cauda longa podem levar a um aumento significativo na energia do para-raios quando um número maior de torres adjacentes é considerado no sistema modelado. Para o sistema analisado, com cinco torres adjacentes, uma corrente de descarga de amplitude 150 kA e tempo de cauda de 250  $\mu$ s, apresentou uma absorção de energia pelo para-raios, instalado na fase C, de 3 kJ/kV da tensão nominal do para-raios. Este valor é o dobro do valor comparado à mesma descarga em um sistema com apenas uma torre adjacente modelada. Conclui-se então que quatro ou cinco torres adjacentes (8 ou 10 torres) devem ser consideradas no modelo de forma a cobrir todas as possibilidades, a fim de se evitar resultados imprecisos.

Uma vez que as descargas atmosféricas apresentam comportamento estatístico, estudos estatísticos devem ser realizados para um correto dimensionamento dos para-raios, a fim de se evitar resultados imprecisos. Dessa forma, este trabalho, através da interação entre os programas MATLAB e ATP, analisou de forma estatística, a energia absorvida pelos para-raios quando da incidência de diferentes descargas sobre uma linha de transmissão de 138 kV. Foram novamente consideradas as condições de instalação de para-raios isoladamente em uma estrutura atingida ou ao longo de todo o sistema. Avaliou-se também a influência da impedância de aterramento da torre atingida na energia absorvida pelos para-raios.

Os resultados mostram que, para o estudo de backflashover analisado, para-raios classe 2, tradicionalmente instalados nas linhas de transmissão, dificilmente serão estressados além de sua capacidade. A máxima energia dissipada pelo para-raios foi aproximadamente 4,3 kJ/kV, para uma onda com amplitude de 200 kA, tempo de frente 2  $\mu$ s e cauda 65  $\mu$ s, resultado este inferior à capacidade de energia de um para-raios Classe 2 que é de 4,5 kJ/kV. Esse resultado é uma boa indicação que um para-raios classe 2 instalado em linha de transmissão de 138 kV, com características semelhantes à analisada, está dimensionado com boa margem de segurança. Além disso, este resultado sugere que para-raios com capacidade de energia menor poderiam ser instalados nestas linhas de transmissão. Os resultados mostraram que as descargas atmosféricas que produzem níveis de energias superiores a 2,1 kJ/kV possuem pequena probabilidade de ocorrência nestes sistemas de transmissão. Isso sugere que para-raios Classe 1 poderiam ser instalados nas linhas de transmissão de 138 kV com a topologia estudada,

resultando ainda assim, em um projeto seguro mas, dessa forma, com custo reduzido.

## 5.1 Propostas de continuidade do trabalho

Neste trabalho, o cômputo da energia absorvida pelos para-raios foi realizado apenas para evitar falhas devidas ao fenômeno de backflashover. Para dar uma consistência maior aos resultados, faz-se necessária a inclusão da incidência das descargas diretamente nos condutores fases e das descargas subsequentes para avaliar a energia absorvida pelos para-raios. Também será interessante computar a probabilidade de uma determinada descarga atmosférica atingir uma determinada torre. Com a adição destas duas análises, será possível dimensionar adequadamente os para-raios instalados nas linhas de transmissão de 138 kV com a topologia utilizada, considerando a capacidade energética dos mesmos.

Um outro ponto interessante seria expandir o programa criado, para o cálculo automático da energia absorvida pelos para-raios, para outros níveis de tensão e para outras topologias de linhas. Com isso, uma interface gráfica poderia ser criada para dimensionar os para-raios, tendo como dados de entrada apenas o nível de tensão da rede, a topologia da linha e a disposição de para-raios na linha de transmissão. Podendo dessa forma, dimensionar adequadamente para-raios para diversas linhas de transmissão.

Uma vez que para-raios Classe 1 não são tradicionalmente fabricados para linhas com tensão de operação de 138 kV, sugere-se testar em escala reduzida a solução de se instalar para-raios Classe 1 nestas linhas de transmissão, de forma a complementar o estudo de simulação computacional realizado e assim, viabilizar a construção e, conseqüentemente, a utilização de um para-raios com capacidade energética menor, o que levará a um custo bastante reduzido no projeto de proteção destas linhas.

Expandir este estudo de absorção de energia para situações envolvendo sobretensões de manobra, também seria um estudo interessante pois, dessa forma, os para-raios ZnO também poderiam ser dimensionados para o controle de sobretensões de manobra.

# Apêndice A

## Publicações

R. O. Pedrosa, I. J. S. Lopes, "Influência dos Parâmetros das Descargas Atmosféricas e da Modelagem da Linha de Transmissão na Absorção de Energia dos Para-raios de ZnO", Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition, Montevideu, Uruguai, 2012.

R. O. Pedrosa, I. J. S. Lopes, S. C. Assis, "Um estudo estatístico da distribuição de energia em para-raios ZnO instalados ao longo de linhas de transmissão", Décimo Quinto Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu - PR, Brasil, Maio de 2013.

# Referências Bibliográficas

- ABB (2004). *Para-raios de alta tensão, Guia do Comprador.*, 5 edição.
- Anderson, D. (2009). *TFlash, Lightning Stroke Simulation Software For Transmission Line Designers*. EPRI.
- Assis, S. C.; Filho, E. B. G.; Coutinho, R. M.; Almeida, J. H. M.; Teixeira, A. M. N. & Franco, J. L. (2012). Metodologia de análise de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas considerando para-raios zno. *IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Goiania – GO*.
- BALESTRO (2010). *Pararraios Poliméricos para Linhas de Transmissão (TLA)*.
- CIGRE (1999). Application of metal oxide surge arresters to overhead lines. Relatório técnico, CIGRE WG 33.11.
- CIGRE (2010). Use of surge arresters for lightning protection on transmission lines. Relatório técnico 440, CIGRE WG C4.301.
- Cunha, L. V. (2010). Desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas: Influência do efeito corona na ruptura do meio de vão. Dissertação de mestrado, Universidade federal de Minas Gerais.
- Diniz, A. M. M. (2011). Ensaio e avaliação elétrica de um novo projeto de para-raios para sistemas de distribuição em média tensão. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá.
- EPRI (1982). *Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above*.
- Franco, J. L. (2001). *Curso sobre Para-raios: Aplicação em redes de distribuição, subestações e linhas de transmissão*. Franco Engenharia.
- Hileman, A. R. (1999). *Insulation Coordination for Power Systems*. North Carolina, CRC Press Taylor and Francis Group.

- Hinrichsen, V. (2001). *Metal Oxide Surge Arrester - Fundamentals*. Siemens, primeira edição.
- King, K. (2004). Handbook for improving overhead transmission line lightning performance. Relatório técnico, EPRI.
- Lima, A. B. (2010). Método para cálculo de malhas de aterramento de torres de linhas de transmissão. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Martinez, J. A. & Castro-Aranda, F. (2005). Lightning performance analysis of transmission lines using the emtp. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20.
- Sadovic, S. (Croácia, 2008). Different line surge arrester application. *Application of Line Surge Arresters in Power Distribution and Transmission Systems*.
- Sakshaug, E. C. (1991). A brief history of ac surge arresters. *IEEE Power Engineering Review*.
- Soares, A.; Visacro, S.; Schroeder, M. A. O.; Cherchiglia, L. C. L. & Carvalho, A. M. (1997). Investigação sobre o aterramento de torres do sistema de transmissão da cemig para melhorias do desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas. *International Symposium on Lightning Protection, São Paulo - Brasil*.
- Tyco (2008). *Bowthorpe EMP Transmission Line Arrester*. Tyco Electronics.
- Viana, J. C. C. (2009). Estudo de aplicação de para-raios zno em linhas de transmissão em regiões de nível cerâmico e resistência de aterramento elevados. Dissertação de mestrado, Universidade federal de Minas Gerais.
- Visacro, S. (2005). *Descargas Atmosféricas: uma abordagem de engenharia*. São Paulo, Artliber Editora Ltda.
- Visacro, S. (2007). Direct strokes to transmission lines: considerations on the mechanisms of overvoltage formation and their influence on the lightning performance of lines. *Journal of Lightning Research*.
- Zanetta, L. C. (2003). *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. edUsp.