

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO EAT E UAT  
FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: INFLUÊNCIA DA  
RUPTURA A MEIO DE VÃO**

**LEONARDO DE CARVALHO ROCHA**

---

**LEONARDO DE CARVALHO ROCHA**

**DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO EAT E UAT  
FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: INFLUÊNCIA DA  
RUPTURA A MEIO DE VÃO**

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.

Área de concentração: Engenharia de Potência  
Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica  
**Orientador: Prof. Silvério Visacro Filho**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE  
CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - CPDEE  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG**

**BELO HORIZONTE**

**MARÇO – 2009**

---

---

## AGRADECIMENTOS

Depois de muito esforço e dificuldades, chego ao final desse desafio. Neste momento importante, não posso deixar de lembrar-me das pessoas, que de uma forma ou de outra, estiveram ao meu lado nessa caminhada.

Agradeço acima de tudo a Deus que, como sempre, soube guiar meus passos e iluminar meus pensamentos para que esse trabalho fosse concluído.

Ao meu orientador, Prof. Silvério Visacro Filho, por toda a ajuda, paciência, incentivo, conhecimento e tempo gentilmente despendido, não só durante o mestrado, mas também no período em que tive a honrosa oportunidade de trabalhar no LRC.

A todos os colegas da Eletronorte, por todos os dados e experiência técnica compartilhada para que eu pudesse investigar os temas propostos neste trabalho.

Aos amigos Daniel e Fabrício, cuja convivência e companheirismo durante quase dois anos aqui em Brasília me ensinaram muito.

À minha namorada, Fernanda, que sempre me apoiou e esteve em cada momento ao meu lado durante a longa caminhada. Obrigado pelo amor e pela paciência.

Aos meus pais, Maurício e Maria Rita e aos meus irmãos Natália e Bernardo e à Dadá (*in memoriam*). A amizade, o exemplo, o carinho e a torcida de vocês me trouxeram até aqui, a vocês devo tudo o que tenho e o que sou, as minhas vitórias também são suas. Muito obrigado por tudo.

---

---

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 RELEVÂNCIA DA INVESTIGAÇÃO	1
1.2 OBJETIVO	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	4
<b>2. MECANISMO DE DESLIGAMENTO POR FALHA DE BLINDAGEM</b>	<b>6</b>
2.1 DESCRIÇÃO DO FENÔMENO	6
2.2 ABORDAGEM TRADICIONAL PARA O CÁLCULO DA FALHA DE BLINDAGEM	9
2.2.1 O RAIO DE ATRAÇÃO	9
2.2.2 A TEORIA ELETROGEOMÉTRICA ORIGINAL	10
2.3 DESAFIOS TRADICIONAIS NO CÔMPUTO DA TAXA DE FALHA DE BLINDAGEM	13
2.3.1 INTRODUÇÃO	13
2.3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS DAS DESCARGAS INCIDENTES EM CABOS FASE	14
2.3.2.1 INTRODUÇÃO	14
2.3.2.2 DISTRIBUIÇÃO DA AMPLITUDE DE CORRENTE	15
2.3.2.3 DISTRIBUIÇÃO DO TEMPO DE FRENTE	16
2.3.2.4 DISTRIBUIÇÃO DO TEMPO DE MEIA ONDA	17
2.3.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TENSÃO DE OPERAÇÃO NA FALHA DE BLINDAGEM	18
2.3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS INCIDÊNCIAS DE DESCARGAS NAS FASES ENERGIZADAS	20
2.3.4.1 DISTRIBUIÇÃO DAS INCIDÊNCIAS NAS FASES ENERGIZADAS EM FUNÇÃO DA DISPOSIÇÃO FÍSICA DAS MESMAS	21
2.3.4.2 CARACTERÍSTICAS OBSERVADAS DOS CANAIS DE DESCARGA INCIDENTES EM CABOS FASE	21
2.3.4.3 DISCUSSÃO DOS ASPECTOS DE INFLUÊNCIA NAS INCIDÊNCIAS OBSERVADAS	22
2.4 PERSPECTIVAS DE APLICAÇÃO DOS TÓPICOS EM DISCUSSÃO	26
<b>3. MECANISMO DE DESLIGAMENTO POR RUPTURA A MEIO DE VÃO</b>	<b>29</b>
3.1 INTRODUÇÃO	29
3.2 O FENÔMENO DE RUPTURA A MEIO DE VÃO	30
3.2.1 INTRODUÇÃO	30

---

---

3.2.2 DESCRIÇÃO DO FENÔMENO E CÁLCULOS ENVOLVIDOS	31
<b>3.3 PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO DA LINHA FRENTE A DESCARGAS A MEIO DE VÃO</b>	<b>37</b>
3.3.1 INTRODUÇÃO	37
3.3.2 AS IMPEDÂNCIAS DE SURTO DO SISTEMA E OS COEFICIENTES DE REFLEXÃO	38
3.3.3 A SUORTABILIDADE A MEIO DE VÃO E AS CORRENTES DE PRÉ-DESCARGA	39
3.3.4 OS TEMPOS DE PROPAGAÇÃO E OS COMPRIMENTOS DAS TORRES E DOS VÃOS	42
3.3.5 OS TEMPOS DE PROPAGAÇÃO E O TEMPO DE FRENTE DA ONDA DE CORRENTE	43
3.3.6 A IMPEDÂNCIA DE SURTO DO CABO PÁRA-RAIOS, A AMPLITUDE DA ONDA DE CORRENTE E O EFEITO CORONA	44
3.3.7 O ACOPLAMENTO ENTRE OS CABOS E A SOBRETENSÃO RESULTANTE ENTRE AS FASES E OS CABOS PÁRA-RAIOS	44
3.3.8 A INFLUÊNCIA DO EFEITO CORONA NO ACOPLAMENTO E NO TEMPO DE PROPAGAÇÃO	46
3.3.9 A INFLUÊNCIA DAS DESCARGAS SIMÉTRICAS E ASSIMÉTRICAS	47
<b>3.4 PERSPECTIVAS DE APLICAÇÃO DOS TÓPICOS EM DISCUSSÃO</b>	<b>48</b>
<b><u>4. AVALIAÇÃO DO FENÔMENO DE RUPTURA A MEIO DE VÃO EM LINHAS DE 500 KV</u></b>	<b><u>49</u></b>
<b>4.1 INTRODUÇÃO</b>	<b>49</b>
<b>4.2 MODELAGEM UTILIZADA NAS SIMULAÇÕES</b>	<b>50</b>
4.2.1 MODELAGEM DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO	50
4.2.2 MODELAGEM DAS CORRENTES DE RETORNO	59
<b>4.3 CÁLCULO DA SUORTABILIDADE A MEIO DE VÃO</b>	<b>65</b>
<b>4.4 METODOLOGIA SIMPLIFICADA DE CÁLCULO DA TAXA DE RUPTURA A MEIO DE VÃO</b>	<b>72</b>
4.4.1 INTRODUÇÃO	72
4.4.2 A DIVISÃO DO VÃO EM TRECHOS	73
4.4.3 CÁLCULO DA CORRENTE CRÍTICA MÉDIA POR TRECHO E A RESPECTIVA PROBABILIDADE ACUMULADA	74
4.4.4 CÁLCULO DA TAXA DE RUPTURA A MEIO DE VÃO ORIGINADO POR PRIMEIRAS DESCARGAS	75
4.4.5 CÁLCULO DA TAXA DE RUPTURA A MEIO DE VÃO PARA DESCARGAS SUBSEQÜENTES	77
<b>4.5 PROCEDIMENTOS E RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES</b>	<b>78</b>

---

---

4.5.1 INTRODUÇÃO	78
4.5.2 FORMAS DE ONDA DAS SOBRETENSÕES RESULTANTES	79
4.5.3 OBTENÇÃO DA TAXA DE RUPTURA A MEIO DE VÃO SEM A CONSIDERAÇÃO DO EFEITO CORONA	84
4.5.4 OBTENÇÃO DA TAXA DE RUPTURA A MEIO DE VÃO COM A CONSIDERAÇÃO DO EFEITO CORONA	104
4.5.5 SÍNTESE DAS ANÁLISES E RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DO DESEMPENHO DAS GEOMETRIAS DE TORRE CONSIDERADAS	125
4.5.5.1 TORRE CONVENCIONAL	127
4.5.5.2 TORRE COMPACTA	128
4.5.5.3 COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO ENTRE A TORRE CONVENCIONAL E A TORRE COMPACTA	129
<b><u>5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE</u></b>	<b>131</b>
5.1 INTRODUÇÃO	131
5.2 CONCLUSÕES A RESPEITO DA INFLUÊNCIA DA FALHA DE BLINDAGEM	132
5.3 CONCLUSÕES A RESPEITO DA RUPTURA A MEIO DE VÃO	133
5.4 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	135
<b><u>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u></b>	<b>137</b>
<b><u>ANEXO A</u></b>	<b>143</b>
<b><u>ANEXO B</u></b>	<b>146</b>

---

## RESUMO

O fenômeno descargas atmosféricas constitui-se a principal fonte de desligamentos em linhas de transmissão. Faz-se necessário, portanto, a compreensão plena dos mecanismos determinantes dos desligamentos devido a incidências de descargas. Este trabalho dá ênfase ao desempenho de linhas de transmissão com níveis de tensão nominal de operação acima de 230 kV frente a descargas atmosféricas.

É apresentada uma análise específica das principais características associadas aos desligamentos motivados por falha de blindagem e ruptura a meio de vão, que são mecanismos que podem influenciar significativamente o índice de desligamentos em linhas de transmissão com níveis de tensão acima de 230 kV. A compreensão desses mecanismos pode subsidiar as ações de projeto de proteção das linhas, para melhorar o desempenho das mesmas frente a descargas, com redução da probabilidade de falha.

A fim de se discutir a influência da falha de blindagem, é efetuada a descrição elementar do fenômeno, os conceitos básicos quanto à metodologia tradicional de modelo eletrogeométrico utilizado para o cálculo da falha de blindagem e os principais desafios atuais no cômputo da taxa de falha, baseados em trabalhos recentes dedicados ao tema.

Em relação à ruptura a meio de vão, são discutidos os principais aspectos relacionados ao fenômeno, os mecanismos envolvidos no estabelecimento da sobretensão resultante no ponto de incidência, e os respectivos parâmetros que influenciam na magnitude da mesma. A partir da modelagem de duas configurações geométricas de linhas de transmissão de 500 kV e considerando formas de onda de corrente da primeira descarga e da descarga subsequente, o fenômeno de incidência a meio de vão é simulado e, através das sobretensões obtidas, são estimadas taxas de ruptura a meio de vão para cada configuração de linha.

---

## ABSTRACT

Lightning is the main source of transmission lines outages. Thus, it is necessary the full understanding of the main mechanisms related to outages due to lightning incidences. This work emphasizes the lightning performance of lines with nominal voltage levels above 230 kV.

This thesis presents a specific analysis of the main characteristics associated to outages caused by shielding failure and midspan backflashover, which are mechanisms that influence significantly the outage rates of transmission lines with nominal voltage levels above 230 kV. The comprehension of those mechanisms may provide technical support to the design of actions related to the line protection, in order to improve their lightning performance, decreasing the failure probability.

In order to discuss the shielding failure influence on the lightning performance, an elementary description of the phenomenon is presented. The basic concepts regarding to the traditional methodology of electrogeometric model used for shielding failure calculations and the main challenges in the computation of failure rates are considered, based on recent works dedicated to the theme.

Regarding the midspan backflashover, this work discusses the main aspects related to the phenomenon, the mechanisms involved in the establishment of the resultant overvoltages at the stricken point and the respective parameters that influence their magnitude. The midspan backflashover phenomenon is simulated from the modeling of two geometrical configurations of 500 kV transmission lines and considering both the first- and subsequent-stroke current waveforms. From the resultant overvoltages, the midspan backflashover rates are estimated for each line configuration.

---



# 1 Introdução

## *1.1 Relevância da Investigação*

O fenómeno Descarga Atmosférica constitui-se na principal fonte de desligamentos das linhas de transmissão e das redes de distribuição de energia eléctrica. As longas extensões de linhas de transmissão determinam uma probabilidade significativa de incidência directa de descargas atmosféricas nestas, com possibilidade de desligamento em decorrência da solicitação dos isoladores pelas sobretensões associadas (VISACRO, 2005).

O carácter estratégico das linhas para o fornecimento de energia e a verificação de que as descargas são a sua principal causa de desligamento sugerem a necessidade de entendimento pleno dos mecanismos determinantes dos desligamentos devido à solicitação por descarga. A compreensão desses mecanismos pode subsidiar a definição e a aplicação de práticas adequadas de protecção para minimizar o número de desligamentos, restringindo-o aos índices aceitáveis para o nível de tensão da linha.

Na prática, é difícil assegurar tais índices, sobretudo quando as linhas atravessam regiões que possuem elevados índices de densidade de incidência e solos de alta

---

---

resistividade.

Fundamentalmente, o desligamento da linha de alta tensão devido a descargas pode decorrer de dois tipos de ocorrências: a incidência direta de descargas nos cabos energizados e a incidência nos cabos de blindagem ou torres.

Em linhas de tensão nominal até 230 kV, o mecanismo que predomina como causa de desligamento é o *backflashover*, que está relacionado à incidência de descargas nos cabos pára-raios. Ao incidir sobre o cabo, a onda de corrente promove um surto de sobretensão que se propaga na linha. Quando tal surto chega à torre, este pode ser capaz de romper o isolamento da linha, através do estabelecimento de um arco elétrico de contornamento do isolador que separa a fase da parte metálica da torre, o qual pode levar a um curto-circuito da fase para a terra, caso a tensão de operação da rede seja capaz de sustentar o arco após o fluxo da corrente de descarga. O sistema de proteção da linha, que tem seus relés sensibilizados pelo fluxo da corrente de curto-circuito, comanda o desligamento desta, que, em alguns casos, pode ser prolongado.

Muitas vezes em linhas de tensão de operação acima de 230 kV, o fenômeno *backflashover* deixa de ser a causa prevalente dos desligamentos. O nível superior de NBI dessas linhas confere maior suportabilidade aos seus isolamentos e, ademais, em função da maior área disponível para implementação de aterramentos, os valores de impedância de aterramento nas torres de linhas desses níveis de tensão podem ser menores. Ambos os aspectos contribuem para reduzir o número de falhas por *backflashover*.

Neste caso, os desligamentos por incidência a meio de vão e as falhas na blindagem da linha passam a ter maior influência no desempenho da mesma. O aumento da altura dos condutores, o maior espaçamento entre fases e os vãos mais longos, típicos nestas linhas, são fatores que ajudam a aumentar a probabilidade de falha por tais mecanismos.

---

Tais aspectos motivam a investigação específica das principais características que envolvem os fenômenos associados a tais mecanismos. A compreensão desses aspectos pode subsidiar as ações de projeto para de proteção das linhas, para melhorar o desempenho das mesmas frente a descargas, com redução da probabilidade de falha.

O trabalho de dissertação propõe a investigação dos desligamentos motivados por falha de blindagem e ruptura a meio de vão, que, em princípio, podem ser os mecanismos prevalentes de desligamento para linhas de tensão superior a 230 kV. Este trabalho se insere no contexto de uma linha de pesquisa desenvolvida no LRC<sup>1</sup> especificamente sobre o desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas e a definição de técnicas para melhoria deste desempenho.

## ***1.2 Objetivo***

O presente trabalho tem caráter exploratório e objetiva avaliar o impacto dos mecanismos de falha de blindagem e ruptura a meio de vão no desempenho de linhas de transmissão de extra-alta tensão e ultra-alta tensão frente a descargas atmosféricas.

Nesta perspectiva é realizada uma análise dos trabalhos mais recentes relacionados aos dois temas para se verificar como os resultados destes afetam as hipóteses assumidas tradicionalmente. Avaliam-se, então, os fatores que interferem na frequência de desligamentos das linhas de transmissão por estes dois mecanismos.

Particularmente, como a literatura é muito pobre no que concerne aos desligamentos por ruptura a meio de vão, a investigação dedica abordagem mais aprofundada ao tema, incluindo extenso trabalho de simulação computacional que quantifica a influência dos diversos fatores que afetam a frequência de

---

<sup>1</sup> LRC (Lightning Research Center) – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas (Resultado da parceria CEMIG-UFMG)

---

---

desligamentos por descarga a meio de vão.

### ***1.3 Organização do Texto***

Este texto foi organizado em seis capítulos e dois anexos. O *Capítulo Um* tem como objetivo expor a motivação desta dissertação e traçar resumidamente os aspectos abordados em cada capítulo.

O *Capítulo Dois* aborda o mecanismo associado ao desligamento das linhas acima de 230 kV por falha de blindagem. São detalhados os conceitos básicos do fenômeno, as características das descargas incidentes diretamente nos cabos condutores da linha e os parâmetros que influenciam na Taxa de Falha de Blindagem como a tensão de operação e a altura das torres. É apresentada uma investigação a respeito do perfil das trajetórias das descargas e a respectivas distribuições das mesmas nos cabos da linha de transmissão.

O mecanismo de desligamentos ocorridos em consequência de descargas a meio de vão é abordado no *Capítulo Três* que descreve detalhadamente todo o processo, desde a incidência da descarga a meio de vão até o estabelecimento da sobretensão resultante. São discutidos os principais parâmetros de influência nos valores de sobretensão e da suportabilidade do isolamento a meio de vão.

Uma avaliação do fenômeno de ruptura a meio de vão no desempenho de linhas de 500 kV frente a descargas atmosféricas é apresentada no *Capítulo Quatro*. Duas configurações típicas de linhas neste nível de tensão e formas de onda de corrente de primeiras descargas e descargas subseqüentes são modeladas, para fins de simulação e obtenção da sobretensão resultante de incidências na região central de diversos comprimentos de vão. A influência de incidência de descargas simétricas bem como do efeito corona é avaliada e discutida. A partir destes resultados, é possível realizar estimativas de taxas de ruptura a meio de vão.

---

As conclusões deste trabalho bem como as respectivas propostas de continuidade são apresentadas no *Capítulo Cinco*.

O *Capítulo Seis* traz as referências bibliográficas utilizadas ao longo deste trabalho.

O *Anexo A* mostra as principais características do sistema de aquisição de dados de incidências em cabos fase, utilizado em (TAKAMI, 2007a).

O *Anexo B* discute os ensaios elaborados em modelos reduzidos de linhas de 500 kV e de ultra-alta tensão, a fim de se verificar a influência da disposição de fases e do cabo pára-raios, na torre e a meio de vão na possibilidade de incidência direta em cabos fase, levando-se em conta a inclinação do canal da descarga incidente.

---

# 2 Mecanismo de Desligamento por Falha de Blindagem

## 2.1 Descrição do Fenômeno

As linhas de transmissão de EAT (extra-alta tensão<sup>1</sup>) e UAT (ultra-alta tensão<sup>2</sup>) estão susceptíveis a apresentarem desligamentos provenientes de incidências de descargas atmosféricas nos cabos fase. Como estas linhas são providas de cabos pára-raios, a incidência de descargas nos cabos fase é denominada falha de blindagem (*shielding failure*). Tais incidências podem levar ou não a desligamentos, dependendo de um conjunto de fatores, dentre os quais o valor da corrente do raio, o valor instantâneo da tensão de fase no momento da incidência, a impedância de surto e o nível de isolamento da linha.

O desligamento da linha pode ocorrer em caso de ruptura do isolamento pelo mecanismo de “*flashover*” e a sustentação do arco elétrico estabelecido entre o condutor e a parte aterrada (VISACRO, 2005). Tal arco geralmente é superficial e apenas contorna o isolador, mas podem ocorrer, ainda que raramente, arcos volumétricos capazes de causar danos ao isolador.

Através do arco, a corrente de descarga flui em direção ao solo e cessa após um breve

---

<sup>1</sup> EAT: aqui consideradas como de tensão entre 345 e 800 kV

<sup>2</sup> UAT: aqui consideradas como de tensão entre 800 e 1500 kV

---

período de tempo. Entretanto, este arco pode ser mantido pela própria tensão de operação da linha, o que configura um curto-circuito, com o fluxo de corrente de baixa frequência do sistema de energia em direção ao solo. Nesse caso, haverá sensibilização do sistema de proteção com o conseqüente desligamento da linha.

Supondo que uma descarga incida sobre uma linha, por ter "vazado" a blindagem da mesma, ou seja, no caso em que a descarga não atinge os cabos pára-raios, a corrente de retorno se divide em duas parcelas (ou ondas) de amplitudes praticamente iguais, que trafegam em direções opostas.

A fim de se avaliar os aspectos básicos desse mecanismo, pode-se considerar o caso básico de uma linha monofásica, isolada da terra pelos isoladores da torre. Considerando que a mesma é atingida por uma descarga, uma corrente de valor  $I_L$  se divide em duas parcelas praticamente iguais, e cada onda de corrente se propaga para um lado da linha. A Figura 2.1 ilustra o fenômeno.

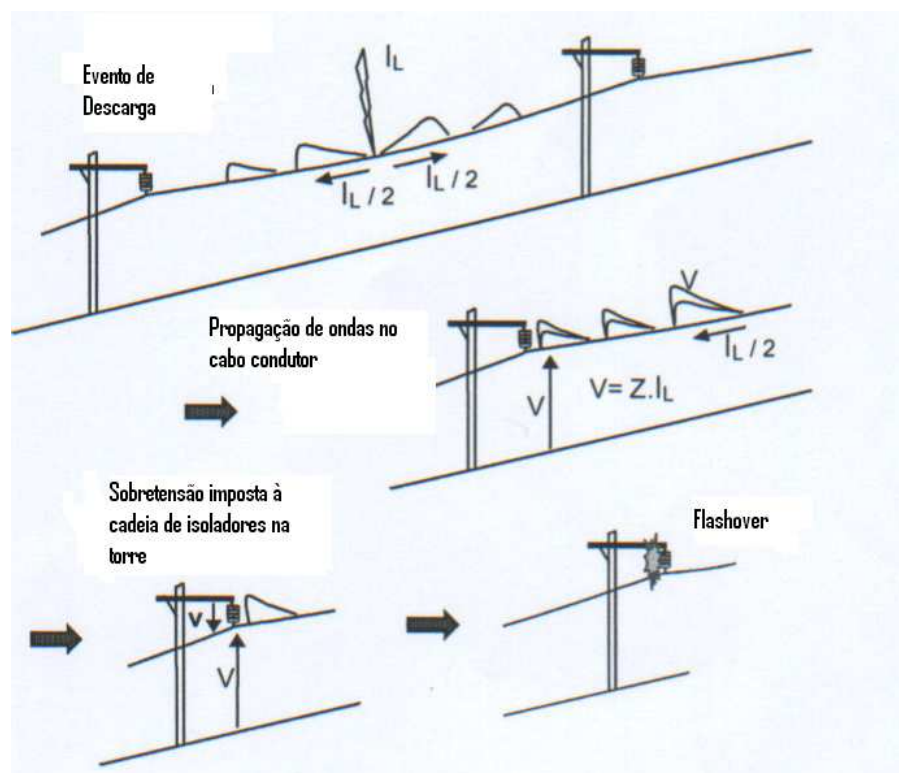


Figura 2.1 - Estágios do Mecanismo de Falha de Blindagem seguido de Ruptura do Isolamento (adaptado (VISACRO, 2005))

Associada a cada onda de corrente, tem-se uma onda de sobretensão associada cuja amplitude é o produto da impedância de onda da linha pela amplitude da onda de corrente. A cada ponto ao longo da linha está associada uma onda de corrente e outra de tensão. A impedância de onda,  $Z_L$ , é definida pela equação 2.1:

$$Z_L = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad \text{Eq. 2.1}$$

Onde:

R, L, G e C são respectivamente os parâmetros por unidade de comprimento resistência, indutância, condutância e capacitância da linha e  $\omega = 2\pi f$  rad/s.

Considerando que os surtos atmosféricos são caracterizados por componentes de alta frequência, a impedância de onda se aproxima da impedância de surto da linha, dada pela equação 2.2:

$$Z_S = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{Eq. 2.2}$$

Para o cálculo do valor de pico da onda de sobretensão em qualquer ponto da linha, utiliza-se a equação 2.3:

$$V_P = Z_S I_P \quad \text{Eq. 2.3}$$

Onde  $I_P$  é o valor de pico da onda de corrente.

Ao atingir uma estrutura aterrada, o isolamento que separa a estrutura do cabo fase fica submetido a uma sobretensão que pode ser capaz de provocar a ruptura do isolamento, estabelecendo um arco elétrico entre o condutor e a estrutura aterrada.



Em caso de não ocorrer ruptura no isolamento, o surto continua a se propagar em direção à subestação, podendo ocorrer, dependendo do nível de atenuação que o surto sofre no seu percurso, a atuação do dispositivo pára-raios da subestação.

Este capítulo apresenta a caracterização dos parâmetros físicos das descargas que incidem nos cabos energizados, bem como uma discussão a respeito dos fatores associados à ocorrência da falha de blindagem.

## ***2.2 Abordagem Tradicional para o Cálculo da Falha de Blindagem***

Para se projetar a blindagem de linhas de transmissão, utiliza-se tradicionalmente o modelo eletrogeométrico. Este permite definir o local de maior probabilidade de ocorrência de incidência de descargas a partir de simplificações do processo final de conexão entre os canais ascendente e descendente, que vão configurar o canal de descarga. Tal modelo se fundamenta no conceito do raio de atração, que permite determinar as regiões de incidência. Os conceitos de raio de atração e do modelo eletrogeométrico são detalhados a seguir.

### ***2.2.1 O Raio de Atração***

Considerando-se a evolução de um canal de descarga descendente, à medida que o canal vai se carregando com a carga oriunda da nuvem de tempestade, o campo elétrico em objetos posicionados no solo abaixo do canal aumenta. A certa distância entre a extremidade do canal e o objeto, o campo elétrico pode se tornar tão intenso na superfície do objeto que pode gerar a ruptura da rigidez dielétrica do ar naquela região, de forma que um canal ascendente começa a evoluir da superfície do condutor até eventualmente se conectar ao canal descendente. Essa distância crítica entre o canal descendente e o objeto, na qual se dá o surgimento de canais ascendentes é conhecida como Distância de Indução do Canal Ascendente.

Existe ainda outro parâmetro importante para fins de avaliação de desempenho da blindagem das linhas frente a descargas atmosféricas. Este parâmetro é o raio de atração, que corresponde a uma distância crítica entre o canal descendente e o objeto. Caso esta

---

distância seja atingida, há grande probabilidade de fechamento do percurso e, conseqüentemente, a materialização da descarga atmosférica, com o fluxo da corrente de retorno.

Muitos pesquisadores desenvolveram relações empíricas para relacionar o raio de atração,  $R_a$ , com a amplitude  $I$  da corrente de descarga, como em (BROWN, 1969) e (LOVE, 1973) onde foram propostas as equações 2.4 e 2.5, onde  $R_a$  é dado em metros:

$$R_a = 9,4I^{2/3} \quad \text{Brown} \quad \text{Eq. 2.4}$$

$$R_a = 10I^{0,65} \quad \text{Love} \quad \text{Eq. 2.5}$$

Coube a Eriksson em (ERIKSSON, 1979), (ERIKSSON, 1987a), (ERIKSSON, 1987b) e Rizk em (RIZK, 1990) aprimorarem tais relações incluindo o cômputo da altura  $h$  da estrutura (equações 2.6 e 2.7):

$$R_a(I, h) = 0,67I^{0,74}h^{0,6} \quad \text{Eriksson} \quad \text{Eq. 2.6}$$

$$R_a(I, h) = 1,57I^{0,69}h^{0,45} \quad \text{Rizk} \quad \text{Eq. 2.7}$$

### ***2.2.2 A Teoria Eletrogeométrica Original***

Um modelo eletrogeométrico básico foi proposto em (YOUNG, 1963). O modelo original foi então aprimorado pela contribuição de vários pesquisadores como em (ARMSTRONG, 1968) e (BROWN, 1969) para fins de implementação em programas de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.

Um modelo simplificado do mecanismo de falha de blindagem pode ser visualizado na figura 2.2, que mostra um único cabo pára-raios e três cabos fase sobre o solo horizontal a uma altura  $H$ . A partir do cabo pára-raios e das fases são traçadas circunferências cujos raios são iguais ao raio de atração, calculados em função de um dado valor de amplitude da corrente de descarga  $e$ , dependendo da relação utilizada, da altura média dos condutores. É traçada ainda uma linha horizontal cuja distância ao solo é igual ao raio de atração. Para fins de simplificação, geralmente considera-se que as descargas são descendentes e verticais.

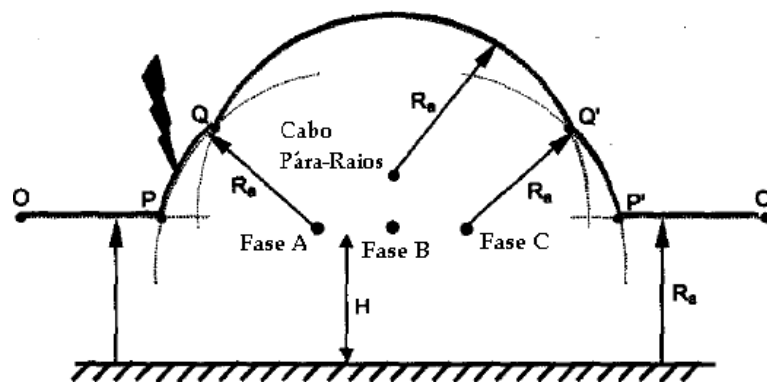


Figura 2.2 – Modelo Eletrogeométrico Simplificado (adaptado (VISACRO, 2005))

A curva  $OPQQ'P'O'$  é formada pelos pontos mais externos das circunferências e da linha horizontal e constituem os primeiros pontos de contato de qualquer canal descendente que se aproxime da linha. Nesse caso, a fase central está totalmente blindada, já que a distância do seu condutor à curva é superior ao raio de atração. No entanto, caso houvesse uma distância maior entre as fases, tal fase poderia estar exposta a descargas diretas de amplitudes mais baixas.

Os trechos  $PQ$  e  $P'Q'$  estão associados aos condutores fase mais externos. Caso um canal descendente de descarga se aproxime da linha atingindo um desses trechos, é esperado que ocorra a sua conexão ao cabo fase associado, já que representa a menor distância ao canal e, portanto, desse cabo fase partirá um canal ascendente que se conectará ao canal descendente (VISACRO, 2005).

Nos estudos de desempenho de linhas de transmissão considera-se inicialmente o valor mínimo de amplitude de corrente de descarga que pode causar uma interrupção do isolamento da linha com seu conseqüente desligamento em caso de falha de blindagem. A partir desse valor de amplitude, tem-se um raio de atração que é utilizado para traçar os trechos conforme indicado na figura 2.2, geralmente para as fases mais expostas, que, no caso em questão, são as fases A e C. Caso não haja nenhum trecho em exposição associado aos cabos fase, ou seja, a circunferência traçada a partir do cabo pára-raios engloba todas as fases (figura 2.3), a linha estará totalmente blindada para descargas cujas amplitudes possam acarretar um desligamento.

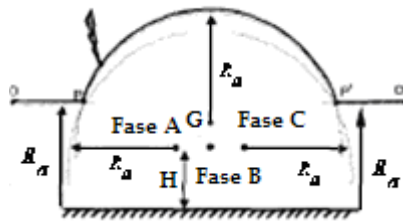


Figura 2.3 – Modelo Eletrogeométrico com as Fases Totalmente Blindadas (adaptado (VISACRO, 2005))

Se a blindagem ainda não for efetiva para aquele valor de amplitude, deve-se repetir o processo, incrementando-se o valor da amplitude de corrente até que os trechos em exposição associados aos cabos fase sejam suprimidos. Como o raio de atração é proporcional ao pico de corrente da descarga, à medida que se aumenta a amplitude diminuem-se os trechos de exposição das fases e aumenta-se o trecho relativo ao cabo pára-raios. Com isso, haverá um valor máximo de amplitude de corrente que poderá atingir os cabos fase.

A taxa de falha de blindagem por 100 km por ano é calculada pela diferença dos valores de probabilidade acumulada relativas aos valores mínimo e máximo das amplitudes de corrente, multiplicada pelo número de descargas por 100 km por ano que incidem verticalmente sobre um trecho médio de exposição das fases (EPRI, 1982).

Pode-se ainda melhorar a blindagem da linha, adicionando-se mais um cabo pára-raios ou reposicionando-os corretamente de modo a evitar que descargas cujas amplitudes sejam

iguais ou superiores ao valor mínimo de corrente que pode causar um desligamento incidam sobre as fases. A fim de se verificar se tais medidas foram eficazes, deve-se repetir o processo de cálculo da taxa de falha de blindagem utilizando a metodologia descrita.

## ***2.3 Desafios Atuais no Cômputo da Falha de Blindagem***

### ***2.3.1 Introdução***

Nos últimos anos vêm sendo desenvolvidas investigações com embasamento experimental dedicadas a uma melhor elaboração do equacionamento das questões envolvidas na blindagem de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Tais investigações abordam aspectos tais como a caracterização dos parâmetros de descarga que vazam a blindagem, o cômputo do nível de tensão da linha, o efeito da disposição das fases e dos cabos pára-raios e o efeito do ângulo de incidência das descargas.

Recentemente, artigos descrevendo alguns resultados correspondentes têm sido publicados. Dentre tais artigos, destacam-se os trabalhos de Takami, que abordam as características de primeiras descargas negativas em cabos fase (TAKAMI, 2007a) e nas torres (TAKAMI, 2007b) de linhas de transmissão de 500 kV e de UAT no Japão. As características físicas e de incidência das primeiras descargas decorrentes de falha de blindagem mostrados por Takami na referência (TAKAMI, 2007a) motivaram novos trabalhos de outros autores.

Em (NAYEL, 2007), Nayel busca verificar a influência do nível de tensão nos cabos fase sobre o raio de atração, enquanto em (TANIGUCHI, 2008), é discutido o efeito do ângulo de incidência das descargas e aborda a influência da disposição geométrica das fases e dos cabos pára-raios ao longo da linha, bem como da distância dos cabos em relação ao solo, na distribuição do número de incidências nos cabos, utilizando como base a geometria das estruturas de 500 kV e de UAT nas quais Takami realizou seus registros de incidência em cabos fase (TAKAMI, 2007a) e em torres (TAKAMI, 2007b).

---

O presente texto considera aspectos de maior interesse de tais artigos na discussão a seguir.

### ***2.3.2 Caracterização dos Parâmetros Físicos das Descargas Incidentes em Cabos Fase***

#### ***2.3.2.1 Introdução***

As linhas de transmissão de EAT e UAT apresentam torres mais elevadas e maiores distâncias entre fases que linhas de transmissão convencionais estando, portanto, mais susceptíveis a sofrer incidência de descargas sobre os cabos energizados. Estes aspectos influenciam nas características das ondas de corrente capazes de vazar a blindagem e, por isso, torna-se importante conhecer as principais características destas correntes.

São raros os dados sobre tais eventos de incidência e uma contribuição relevante nesse sentido é aquela apresentada por Takami em um estudo baseado em levantamentos estatísticos a partir de medições reais, no Japão, onde as características de 81 primeiras descargas incidentes em cabos fase foram observadas através de medições realizadas entre 1998 e 2004, sendo que 79 medições registradas foram provenientes de descargas negativas (TAKAMI, 2007a). Sistemas de observação foram instalados em linhas de ultra-alta tensão e de 500 kV de forma a observar as características das descargas. Os detalhes a respeito do sistema de observação utilizado bem como a metodologia empregada para que fosse possível a estimação dos parâmetros são discutidos no Anexo A. Na discussão a seguir somente são considerados os registros oriundos de primeiras descargas negativas.

Para fins de comparação, outro trabalho de mesma autoria é abordado nessa discussão. Em (TAKAMI, 2007b), Takami apresenta os resultados obtidos a partir de registros de incidências em torres de transmissão na mesma região. Foram monitoradas 60 torres de transmissão, principalmente de linhas de 500 kV, e foram obtidas 120 formas de onda oriundas de descargas negativas nas torres, sendo que três registros têm amplitude acima de 100 kA e tempos de frente variando entre 6,3  $\mu$ s e 7,6  $\mu$ s.

---

A configuração geométrica básica das torres para as quais foram registradas as incidências nas torre e nos cabos fase por Takami em (TAKAMI, 2007a) e (TAKAMI, 2007b) é mostrada na figura 2.4. Trata-se de uma torre em circuito duplo, com dois cabos pára-raios e uma disposição vertical de fases.

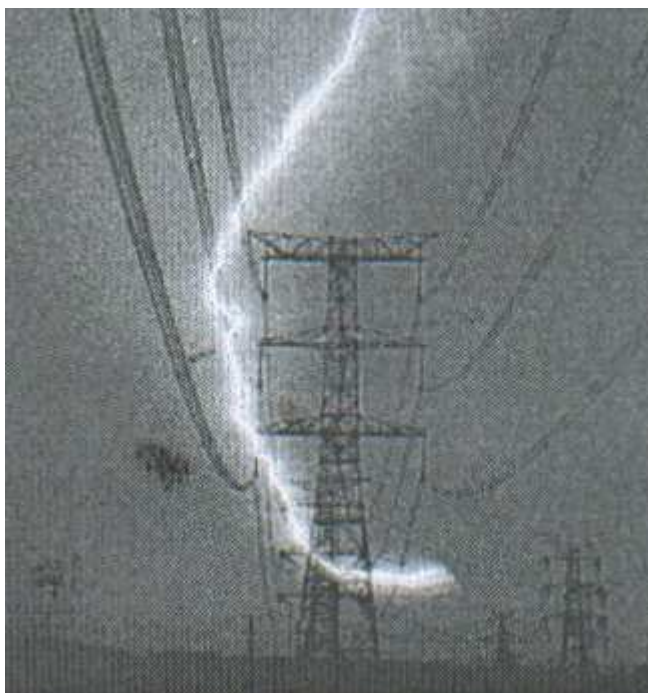


Figura 2.4 - Configuração geométrica Básica das Linhas de Transmissão ( adaptado (TAKAMI, 2007a))

A distribuição estatística dos parâmetros físicos das descargas que atingem os cabos fase é diferente dos parâmetros de descargas incidentes em torres de transmissão e cabos pára-raios. Nos tópicos a seguir, são efetuadas algumas comparações de modo a se distinguir as características físicas das descargas que atingiram os condutores fase das características das descargas incidentes sobre as torres de transmissão através da comparação dos registros de parâmetros de primeiras descargas negativas obtidas por Takami em torres de transmissão (TAKAMI, 2007b) com aquelas obtidas por incidências nos cabos fase (TAKAMI, 2007a) para uma mesma configuração de torre e uma mesma região.

### ***2.3.2.2 Distribuição da Amplitude de Corrente***

A Figura 2.5 mostra a distribuição da probabilidade acumulada da amplitude de corrente tanto para descargas diretas nos cabos fase em (TAKAMI, 2007a) quanto para incidências observadas em torres por Takami em (TAKAMI, 2007b). Os valores correspondentes a

probabilidade acumulada de 5%, 50% e 95% são de 30,2 kA, 14,7 kA e 7,1 kA respectivamente, a partir de uma distribuição logarítmica normal. A máxima amplitude de corrente observada foi de 36 kA.

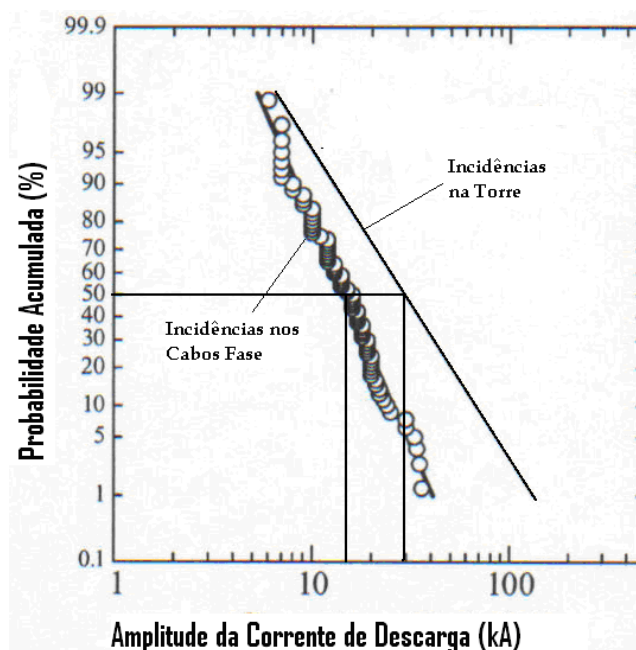


Figura 2.5 – Distribuição da Probabilidade Acumulada de Amplitude de Corrente (adaptado (TAKAMI, 2007a))

Nos registros de descargas incidentes nas torres obtidos por Takami em (TAKAMI, 2007b), para a probabilidade acumulada de 50% encontrou-se um valor de amplitude de 29,3 kA. Sabe-se que valores de amplitude são menores em caso de incidências por falhas de blindagem do que em caso de incidências em torres e cabos pára-raios, e tais observações vieram a comprovar tais afirmações. Para um pequeno raio de atração, que implica baixas amplitudes de corrente de descarga, o efeito de blindagem dos cabos pára-raios tem pouco efeito (BROWN, 1969).

### 2.3.2.3 Distribuição do Tempo de Frente

A Figura 2.6 mostra a distribuição do tempo de frente das descargas registradas tanto para os registros oriundos de incidências nas fases de (TAKAMI, 2007a) quanto para os registros de incidências em torres da referência (TAKAMI, 2007b). Para incidências nos cabos fase, o tempo de frente apresentou valores de 8,1  $\mu$ s, 3,0  $\mu$ s e 1,1  $\mu$ s para as distribuições de probabilidade acumulada de 5%, 50% e 95% respectivamente, a partir de uma distribuição logarítmica normal.



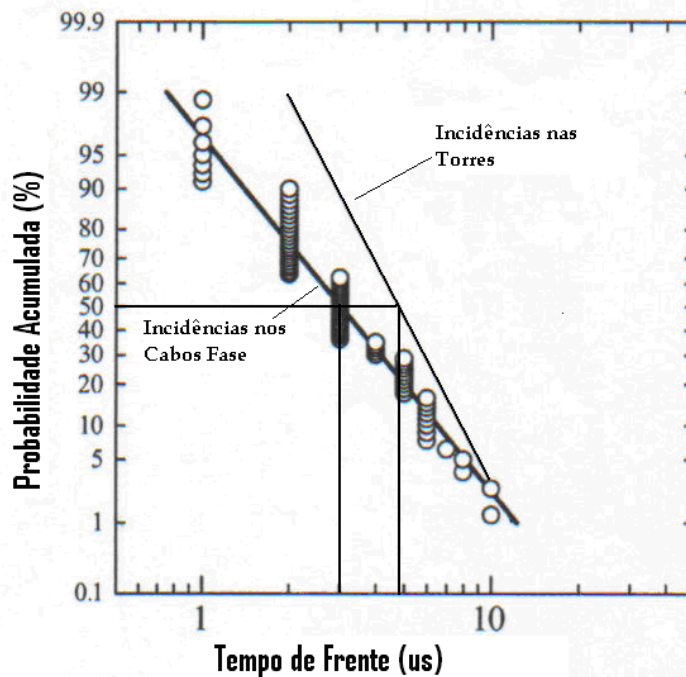


Figura 2.6 – Distribuição da Probabilidade Acumulada de Tempo de Frente ( adaptado (TAKAMI, 2007a))

Nas incidências de descargas em torres de transmissão obtidas em (TAKAMI, 2007b), os valores de tempo de frente são geralmente maiores que aqueles observados para descargas diretas nos cabos fase, sendo o valor correspondente à probabilidade acumulada de 50% para tempo de frente igual a 4,8  $\mu$ s.

Nos registros de incidências nas torres (TAKAMI, 2007b) foi verificado que baixos valores de amplitude de corrente implicam curtos tempos de frente, o que explica o fato dos valores deste parâmetro encontrados para descargas originadas por falhas de blindagem em (TAKAMI, 2007a) serem inferiores.

#### ***2.3.2.4 Distribuição do Tempo de Meia Onda***

A estimativa do tempo de meia onda é menos precisa que a estimativa dos parâmetros de amplitude de corrente e de tempo de frente a partir de medições indiretas. A título de referência, em (TAKAMI, 2007a) foi estimado tal parâmetro, a partir dos dados disponíveis, com uma distribuição entre 4  $\mu$ s e 160  $\mu$ s. Os valores deste tempo cujas probabilidades acumuladas são de 5%, 50% e 95% são, respectivamente, 145  $\mu$ s, 38  $\mu$ s e 10  $\mu$ s, quando a probabilidade acumulada é representada hipoteticamente por uma

distribuição logarítmica normal. A Figura 2.7 ilustra os resultados encontrados.

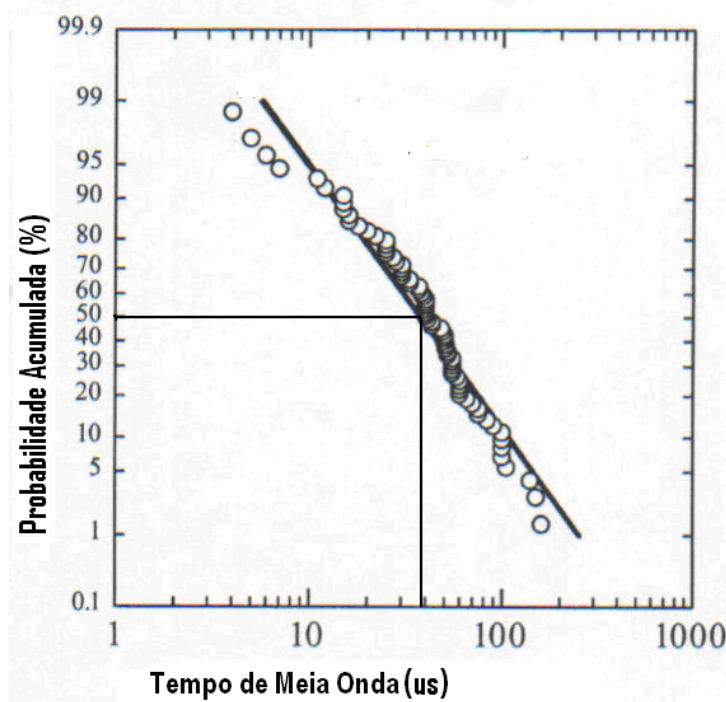


Figura 2.7 – Distribuição da Probabilidade Acumulada do Tempo de Meia Onda (TAKAMI, 2007a)

Os valores de tempo de meia onda abaixo de 10  $\mu\text{s}$  são muito baixos e bastante atípicos em relação a outras observações e podem estar associados a falta de precisão da metodologia de estimativa deste parâmetro através de medições indiretas ou podem estar relacionados à formação de canal ascendente, induzido por algum canal descendente que não chegou a se interligar para que se estabelecesse a descarga de retorno.

O valor do tempo de meia onda geralmente está associado à quantidade de energia do surto. Esse é o parâmetro influencia principalmente os danos em cabos pára-raios e em dissipadores de surto e não influencia significativamente nas sobretensões que a linha possa sofrer a não ser que tenha uma duração extremamente curta.

### ***2.3.3 Análise da Influência da Tensão de Operação na Falha de Blindagem***

A partir dos registros de descargas em cabos fase obtidos por Takami em (TAKAMI, 2007a), foi possível levantar a distribuição dos ângulos das fases nos cabos energizados no instante da incidência das descargas. Cerca de 70% das incidências nos cabos fases ocorreram durante o semiciclo positivo da onda senoidal de tensão ( $0^\circ$  a  $180^\circ$ ), ou seja, as

incidências acontecem em sua grande maioria quando a polaridade da fase é oposta á polaridade do canal de descarga, já que só foram consideradas as incidências de descargas negativas no trabalho em questão. A Figura 2.8 mostra a distribuição de ângulos verificada.

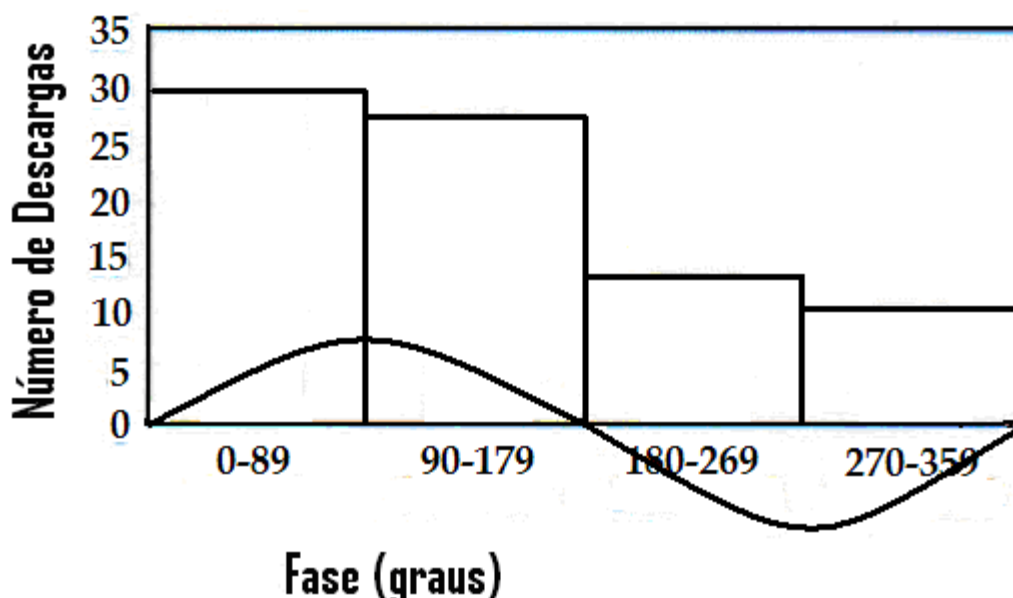


Figura 2.8 - Distribuição do Número de Descargas em Função do Ângulo no Instante de Incidência (adaptado(TAKAMI, 2007a))

Quando o canal descendente negativo se aproxima de uma linha de transmissão, o campo elétrico médio entre a extremidade do canal e o cabo energizado carregado positivamente é superior em relação ao cabo de potencial nulo ou negativo, aumentando a probabilidade de ocorrer uma conexão entre ambos. Por outro lado, caso o cabo esteja energizado com um valor instantâneo negativo de tensão, ocorrerá um efeito inverso, dificultando a formação de um canal ascendente a partir desse cabo.

As observações verificadas motivam uma investigação mais profunda da influência da tensão do condutor energizado no mecanismo de falha de blindagem e, conseqüentemente, na taxa de falha de linha de transmissão. O autor teve acesso a notas ainda não publicadas de Nayel, da Tsinghua University, da China, na qual o mesmo propõe a consideração do efeito do nível de tensão de operação da linha no raio de atração da mesma (NAYEL, 2007). Sua proposta é a incorporação de um coeficiente à equação de raio de atração de Eriksson, obtido a partir de simulações utilizando o modelo de

progressão do líder (GOLDE, 1945), (SINGER, 1972), (CHOWDURI, 1989), (DELLERA, 1990a), (DELLERA, 1990b).

A partir de resultados preliminares, utilizando-se tal modificação na equação de raio de atração, a consideração do efeito da tensão poderia aumentar as taxas de falha de blindagem para linhas tanto em tensão contínua quanto em alternada, sendo que tal acréscimo da taxa poderia chegar à ordem de 0,05 desligamentos por 100 km por ano.

Com relação às linhas em tensão contínua, Nayel demonstrou que, ao se inserir uma distribuição de blindagem assimétrica, ou seja, ângulos de blindagem diferentes para os dois pólos, de forma a reduzir o ângulo de blindagem do pólo positivo, consegue-se reduzir a Taxa de Falha de Blindagem da mesma já que, devido à polaridade da tensão aplicada, o pólo positivo estaria mais susceptível a descargas.

Já para linhas em tensão alternada, as conclusões de Nayel denotam o efeito do ângulo da tensão alternada quanto à Taxa de Falha. A Taxa tem valores mais elevados para os ângulos de fase correspondentes aos valores instantâneos de tensão positivos nos cabos, atingindo seu valor máximo para os ângulos de fase em que as tensões atingem seu pico no semiciclo positivo, conforme já havia sido observado nos registros de descargas nos cabos fase obtidos por Takami e discutidos em (TAKAMI, 2007a).

Ao contrário de linhas de transmissão em tensão contínua, as linhas em tensão alternada devem apresentar uma disposição simétrica dos cabos de blindagem em relação aos demais condutores, de forma a se garantir a melhor Taxa de Falha de Blindagem possível.

#### ***2.3.4 Caracterização das Incidências de Descargas nas Fases Energizadas***

Para as descargas nas fases energizadas registradas por Takami em (TAKAMI, 2007a), foi apresentada a distribuição das incidências em função da disposição das fases para a geometria indicada na figura 2.4 Neste item são discutidos alguns aspectos relevantes relacionados a essa distribuição, e também a respeito do tipo de incidência verificada através de imagens coletadas por câmeras.

---

### ***2.3.4.1 Distribuição das Incidências nas Fases Energizadas em Função da Disposição Física das Mesmas***

É importante conhecer a relação entre a disposição física dos cabos fase e o número de descargas que incidem sobre os mesmos, de forma a se criar a possibilidade de mapear quais fases ficam mais vulneráveis a sofrerem descargas.

Nos registros de descargas nas fases energizadas apresentados por Takami em (TAKAMI, 2007a) foi quantificado o número de incidência de descargas em função da disposição vertical dos cabos fase nas linhas estudadas. Cerca de 43% das descargas atingiram os condutores da fase mais alta na torre, 34% dos registros atingiram os condutores na fase central e 23% o condutor na fase mais baixa. As incidências ocorrem com maior frequência na fase mais alta, e o número de descargas decresce até chegar à fase mais baixa. A Figura 2.9 mostra a distribuição de incidência em função da posição da fase atingida.

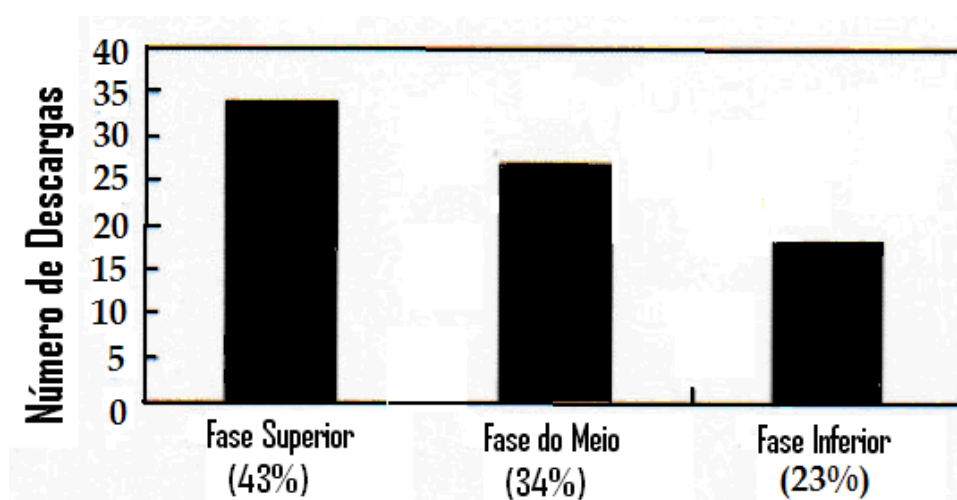


Figura 2.9 - Distribuição do Número de Descargas em Função da Fase Atingida (adaptado (TAKAMI, 2007a))

### ***2.3.4.2 Características Observadas dos Canais de Descarga Incidentes em Cabos Fase***

Baseado em observações reais e medições em campo de incidências de descargas diretas nos cabos fase (TAKAMI, 2007a), constataram-se diferenças entre o que se é observado na teoria e em simulações e o que realmente ocorre na prática em linhas acima de 500 kV.

Nos registros das incidências nos cabos fase observadas por Takami em (TAKAMI,

2007a), através de imagens fornecidas por câmeras, pôde ser verificado o formato do canal da descarga incidente. Em quase todas as incidências, observou-se que o canal de descarga tem uma trajetória horizontal ao incidir sobre um dos cabos fase.

Tais descargas tiveram canais precursores cujas formações se deram inicialmente na direção vertical ao solo. No instante em que se aproximaram das adjacências da linha, tiveram sua trajetória modificada e passaram a ter um comportamento quase horizontal em direção aos cabos, até atingirem um dos cabos fase. A Figura 2.10 ilustra um exemplo de incidência que ocorreu na fase superior.

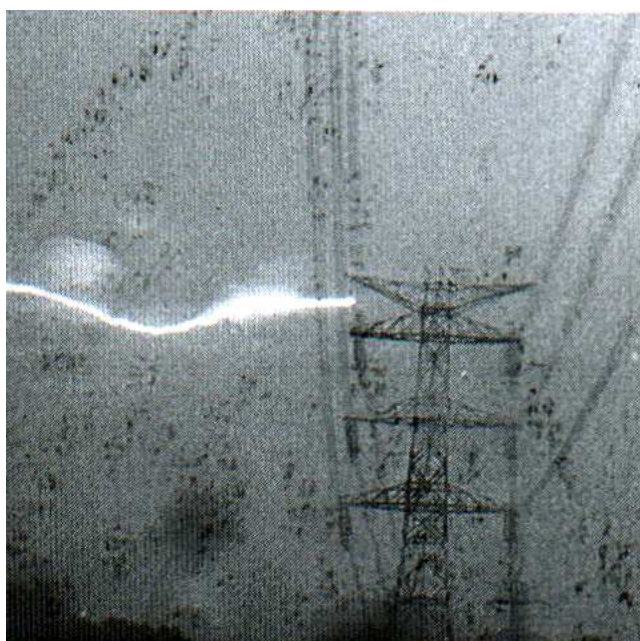


Figura 2.10 – Fotografia do Instante da Incidência na Fase Superior de um Circuito da Linha (adaptado (TAKAMI, 2007a))

#### ***2.3.4.3 Discussão dos Aspectos que Influenciam nas Incidências Observadas***

Os dados discutidos anteriormente a respeito das incidências de descargas nas fases observadas em (TAKAMI, 2007a) estimulam uma nova investigação: uma vez que, em quase todos os registros, o estágio final de formação do canal precursor de descarga ocorreu na horizontal e que grande parte das incidências observadas ocorreram na fase superior, torna-se interessante levantar os aspectos que influenciam, nesse caso, para que um ou outro cabo seja atingido pela descarga em linhas de UAT. É importante também a

verificação da eficácia da blindagem para essa situação em que o canal precursor tem sua trajetória de formação modificada.

Para entender tal fenômeno e investigar o efeito da blindagem para esse tipo de incidência, no trabalho em referência (TANIGUCHI, 2008) foram detalhados testes realizados em modelo reduzido, de forma a se reproduzir a incidência horizontal.

Foram ensaiados arranjos típicos de linhas de ultra-alta tensão (UAT) e de 500 kV, numa escala de 1:20 e utilizou-se como eletrodo de alta tensão uma haste metálica cuja posição e distância foi variada em relação aos condutores de modo a simular as aproximações dos canais precursores na direção horizontal que foram observadas nas incidências em cabos fase em (TAKAMI, 2007a). Uma rampa com inclinação de  $16^\circ$  foi posicionada para que o trajeto real da linha fosse representado. A Figura 2.11 ilustra a configuração básica de ensaio.

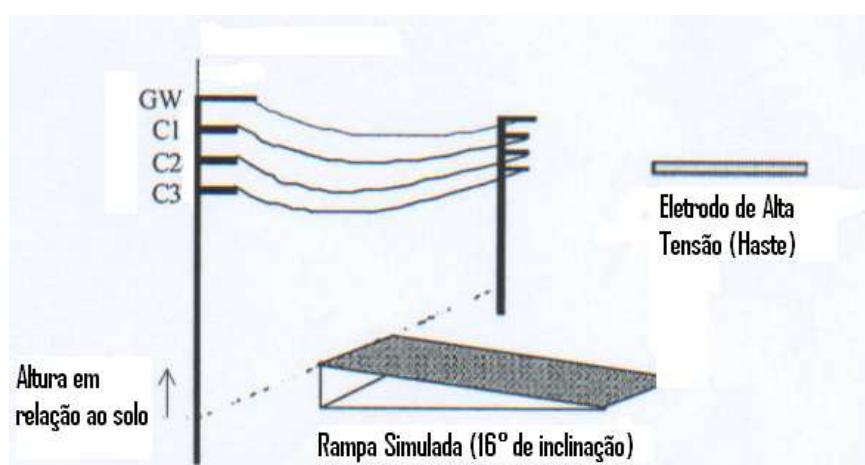


Figura 2.11: Esquema de Ensaio Proposto para Simulação do Arranjo dos Condutores (adaptado (TANIGUCHI, 2008))

Variaram-se as configurações dos cabos e a posição da haste na estrutura ensaiada, e obteve-se o número de descargas que ocorriam entre a haste e os cabos, o que possibilitou comparações de resultados dos testes feitos em estruturas típicas de linhas de 500 kV e de ultra-alta tensão e também entre configurações típicas dos cabos na torre e a meio de vão. Observou-se a variação do número de incidências nos cabos alterando-se a altura dos mesmos em relação ao solo. O Anexo B mostra com detalhes o experimento em questão, bem como os resultados observados.



Tal experimento possui algumas limitações que devem ser consideradas. É dito pelos próprios autores de (TANIGUCHI, 2008) que tal modelo, por ser reduzido, pode não representar de forma eficaz as características reais do fenômeno de descarga, principalmente no que diz respeito à distância de salto final, devido ao comprimento de gap empregado no teste.

Outra limitação é que os eletrodos que simulam os cabos fase da linha de transmissão foram apenas aterrados, não foram simuladas hipóteses nas quais tais condutores se encontram energizados, o que pode ser investigado posteriormente, face à influência verificada em (NAYEL, 2007) e que foi detalhada no item 2.3 desta dissertação.

As fases do circuito da linha foram representadas por condutores simples de raio equivalente ao feixe com diversos condutores por fase utilizados em linhas reais. Essa simplificação certamente acarreta diferenças entre valores de campo elétrico ocorridos no estudo e os valores reais na região vizinha ao condutor ou ao feixe, bem como na forma como o campo elétrico interage entre os cabos fase e o cabo pára-raios.

Finalmente, utilizou-se em (TANIGUCHI, 2008) impulsos típicos de manobra, que possuem características bem diferentes, em termos de tempos de frente e de tempo de duração da descarga, se comparados aos impulsos típicos atmosféricos.

Dentro de tal experimento, alguns aspectos observados ajudam a compreender os dados de incidência nos cabos fase que foram registrados por Takami em (TAKAMI, 2007a) e que foram já foram detalhados. Inicialmente, fica comprovado o fato de que sempre o menor dentre os gaps formados entre a haste e os condutores está mais sujeito a sofrer uma descarga. Ou seja, o canal, ao se aproximar da estrutura, tem uma probabilidade maior de se conectar ao condutor mais próximo. Quanto mais distantes estiverem as fases uma das outras, maior a probabilidade da fase mais próxima ao canal precursor sofrer a descarga. Fica a questão se, caso os condutores fase estivessem energizados, se tal probabilidade sofreria algum impacto.

---



Se a haste está a uma mesma distância do cabo fase superior e o cabo pára-raios, existe uma tendência maior de o cabo pára-raios sofrer a descarga. Isso se explica pelo fato do cabo pára-raios ter um diâmetro menor quando comparado ao cabo fase, o que resulta em um campo elétrico mais intenso no cabo mais fino e conseqüentemente em um maior número de descargas no mesmo. Entretanto ambos os cabos estavam aterrados e, portanto, não se sabe se o número de incidências para cada cabo teria a mesma proporção se o cabo fase estivesse energizado. Com isso, o autor da referência (TANIGUCHI, 2008) conclui que se o canal precursor de aproxima da estrutura a uma distância do cabo pára-raios igual ou menor à distância do cabo fase superior, não se considerando o efeito da tensão, há uma maior probabilidade de que a descarga atinja a blindagem.

Na referência (TANIGUCHI, 2008) são comparados os resultados de incidências observados para a configuração de linha em 500 kV com a configuração de linha em UAT com a haste posicionada na horizontal em relação à estrutura e é constatado que a fase inferior na configuração em 500 kV fica mais susceptível a sofrer descargas. O mesmo fenômeno foi observado quando se reduziu a altura dos cabos em relação ao solo. O autor do trabalho conclui então que tal efeito se deve a maior proximidade da fase inferior em relação ao solo para linhas de 500 kV, o que faz com que a o estágio final de formação do canal precursor tenda a ocorrer na direção descendente, ocasionando um maior número de descargas sobre a fase inferior.

Com relação à diferença de configuração dos cabos na torre e a meio de vão, percebe-se que, como o cabo pára-raios está mais distante dos cabos condutores a meio de vão do que na torre, a probabilidade do cabo pára-raios ser atingido será menor. Por isso, em caso de haver uma aproximação horizontal do canal precursor, as fases estão mais sujeitas a sofrerem uma descarga a meio de vão.

Os dois últimos parágrafos ajudam a entender os registros de incidências nos cabos fase detalhados por Takami em (TAKAMI, 2007a) em relação ao número de incidências em função da disposição física dos condutores. Como as torres das linhas de 500 kV e de UAT

---

são relativamente mais altas que linhas convencionais, deixando os cabos mais distantes do solo, ocorre uma probabilidade do cabo fase superior ficar mais vulnerável a incidências e o cabo inferior sofrer menos descargas. Esse fenômeno também é favorecido pelo fato dessas linhas possuírem vãos muito longos, o que faz com que a fase superior fique mais afastada do cabo pára-raios ao longo do vão, reduzindo o efeito de blindagem nesse trecho.

## ***2.4 Perspectivas de Aplicação dos Tópicos em Discussão***

Os dados de incidência nos cabos fase registrados por Takami em (TAKAMI, 2007a) e discutidos nesse capítulo possuem características que fogem das características dos modelos utilizados para verificação de desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas, o que sugere que tais modelos devem ser reavaliados no sentido de se incluir os aspectos até aqui observados.

Em relação ao nível de tensão dos cabos fase, a proposta feita por Nayel em (NAYEL, 2007) em se considerar a tensão de operação na equação do raio de atração, aumentaria em princípio a confiabilidade do projeto em questão quanto ao seu desempenho frente a descargas atmosféricas.

Os programas de cálculo de desempenho frente a descargas atmosféricas tradicionais, bem como a teoria apresentada em literaturas que abordam o tema não levam em conta a influência da tensão de operação ao calcular a Taxa de Falha de Blindagem. As equações utilizadas para cálculo do raio de atração geralmente levam em conta apenas a amplitude da corrente de descarga. O Método dos Dois Pontos, utilizado em programas de cálculo, e que é detalhado em (EPRI, 1982), utiliza a equação 2.5 para o cálculo do raio de atração relacionado apenas à amplitude de corrente.

Apesar de uma possível influência da tensão de operação verificada por Takami em (TAKAMI, 2007a) e os valores de taxas de falha de blindagem apresentados por Nayel em (NAYEL, 2007), sugerindo-se algo da ordem de 0,05 desligamentos por 100 km por ano não causam, em princípio, um grande impacto no desempenho de linhas de transmissão.

---

No entanto, mesmo pequenos acréscimos de taxa de falha por 100 km por ano se tornam importantes para linhas muito longas, pois aumentam a probabilidade de desligamentos. Outro aspecto a ser levado em conta é que as taxas de desligamento por descargas atmosféricas diminuem à medida que se trabalha com tensões de operação mais elevadas, o que aumenta a influência da taxa de falha de blindagem.

Além disso, conforme observado, quanto maior a tensão de operação, maior será o raio de atração e, conseqüentemente, haverá um aumento da probabilidade de falha, com descargas de amplitude de corrente um pouco maiores. Apesar de haver Níveis Básicos de Isolamento maiores em linhas com tensão de operação elevadas, deve-se tomar o devido cuidado ao se estudar as sobretensões oriundas de tais incidências.

Os modelos originais discutidos em (ARMSTRONG, 1968) e (BROWN, 1969) prevêem poucas descargas nos cabos fase mais altos e mais incidências nos cabos fase mais baixos, devido ao efeito de blindagem dos cabos pára-raios que estão próximos, o que contradiz com o que foi verificado nos registros de incidências em cabos fase de Takami (TAKAMI, 2007a), para a configuração de torre em 500 kV já detalhada. Isso indica que tais modelos precisariam ser melhorados, levando-se em conta tais observações.

Os ensaios discutidos no item 2.3.4 ajudam a entender melhor os efeitos da aproximação do canal precursor por diferentes ângulos de incidência e mostra ainda a influência da geometria da linha e da disposição dos cabos ao longo da mesma. Ao se considerar apenas incidências verticais na linha como geralmente ocorre nos modelos eletrogeométricos atuais, pode-se esperar resultados pouco precisos diante do que foi observado na prática para incidências nas fases. No entanto é necessário ainda que sejam desenvolvidos novos testes levando-se em conta a tensão de operação das fases. Como já foi discutido anteriormente, esse procedimento provavelmente irá trazer resultados diferentes ao ensaio, permitindo que se chegue a conclusões mais precisas a respeito das incidências observadas.

Apesar dos aspectos discutidos neste capítulo mostrarem, a princípio, sua relevância no

---

---

cômputo da taxa de falha de blindagem de uma linha de transmissão, é importante enfatizar que tais conceitos ainda não estão consolidados. Novos registros em outras linhas em regiões diferentes e novos ensaios em estruturas típicas devem ser realizados e analisados a fim de se verificar que as características observadas por Takami para incidências nos cabos fase em (TAKAMI, 2007a) sejam características gerais para linhas de 500 kV e de UAT e que não se tratem apenas de casos específicos que ocorrem naquela região e naquelas estruturas em especial. As discussões de Nayel a respeito da necessidade de modificação do Raio de Atração de modo a se considerar a influência da tensão de operação (NAYEL, 2007) ainda precisa ser detalhada, discutida e validada e no meio acadêmico envolvido na pesquisa de desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas.

Outros parâmetros como o efeito das torres da linha e a flecha do condutor poderiam afetar o cálculo da taxa de falha, conforme detalhado em (VAHIDI, 2008). No entanto, não são discutidos detalhadamente nesta dissertação.

---

# 3 Mecanismo de Desligamento por Ruptura a Meio de Vão

## *3.1 Introdução*

As linhas de transmissão de EAT e de UAT possuem características físicas próprias que podem lhes conferir susceptibilidade a sofrerem desligamentos oriundos de descargas nos cabos pára-raios a meio do vão em decorrência das sobretensões elevadas ali geradas.

Os vãos muito longos, características típicas de tais linhas, podem fazer com que as incidências ocorram em pontos distantes das torres e dos seus aterramentos. Torres elevadas e vãos de longos comprimentos acarretam um maior tempo de trânsito das ondas que ali se propagam devido a uma incidência no meio do vão, reduzindo a influência dos pontos aterrados adjacentes. Conseqüentemente, a sobretensão no ponto de incidência pode atingir valores muito elevados se comparados aos valores resultantes de incidências diretas nas torres. Como é visto no próximo item, isto pode ocasionar a ruptura do isolamento do ar entre o cabo pára-raios atingido e uma das fases próximas, seguido de curto-circuito e o conseqüente desligamento da linha (VISACRO, 2007).

A literatura tradicional pouco aborda a ruptura a meio de vão, muitas vezes considerando-a irrelevante ou improvável (EPRI, 1982). Geralmente assume-se que, devido aos efeitos de correntes de pré-descarga (WAGNER, 1963), que é explicada sucintamente no item 3.3.3, e ao efeito corona (MACANN, 1947) no processo de ionização

---

do isolamento entre os cabos, as sobretensões resultantes de descargas a meio de vão não são suficientemente elevadas para causar interrupção. Alguns poucos trabalhos mais recentes como (SOARES Jr., 2001) e (SOARES Jr, 2005) buscam chamar a atenção da necessidade de se avaliar o fenômeno.

Muitos programas computacionais, como o FLASH, desenvolvido pelo IEEE (IEEE, 1997b), restringem a análise apenas a verificações de sobretensões resultantes nos isoladores da torre devido à ocorrência de incidências próximas à torre ou no cabo fase, desconsiderando-se a possibilidade de ruptura a meio de vão. Entretanto, os fatos citados acima a respeito de projetos de linhas de 500 kV e UAT motivam uma discussão a respeito desse mecanismo.

Este capítulo realiza uma análise dos aspectos relacionados ao fenômeno de ruptura a meio de vão, os mecanismos envolvidos no estabelecimento da sobretensão resultante no ponto de incidência, e os respectivos parâmetros que influenciam na magnitude da mesma.

## ***3.2 O Fenômeno de Ruptura a Meio de Vão***

### ***3.2.1 Introdução***

Sabe-se que os cabos pára-raios são dispostos acima dos cabos fase de modo a garantir que estes fiquem blindados a sofrerem descargas diretas com certos ângulos de incidência e valores de amplitude. Esses cabos são conectados à terra a partir de estruturas aterradas que são geralmente as torres de transmissão. As correntes que chegam a essas estruturas através dos cabos pára-raios são direcionadas para o solo.

Ao evitar a ocorrência de descarga nos cabos fase, os cabos pára-raios previnem o desligamento da linha devido ao fenômeno de *flashover*, detalhado no Capítulo 2 desta dissertação. Entretanto, outro tipo de falha na isolação pode ocorrer devido a uma incidência que ocorra em um dos cabos pára-raios ou mesmo na torre, chamado de *backflashover*. A figura 3.1 ilustra a representação de uma linha de transmissão de 500 kV

---

convencional, sendo atingida por uma descarga em um de seus cabos pára-raios a meio de vão, seguida por uma ruptura de isolamento naquele ponto.

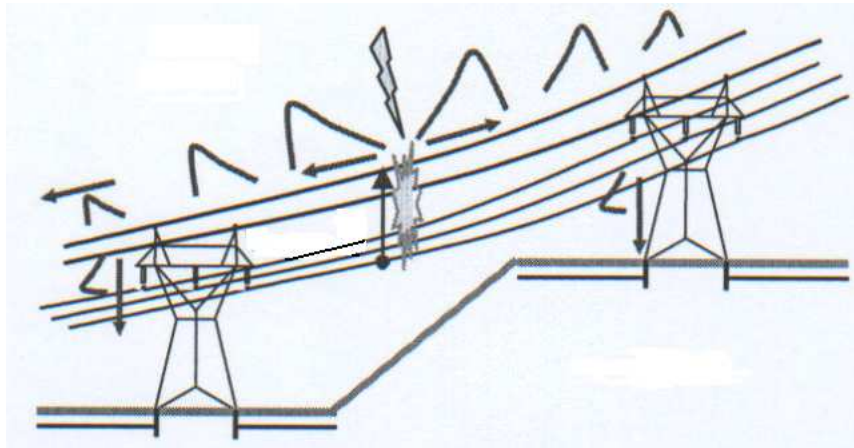


Figura 3.1: Ocorrência de Ruptura a Meio de Vão em uma Linha de 500 kV Convencional (adaptado (VISACRO, 2007)).

Neste item é apresentada a descrição do fenômeno de ruptura de isolamento no ponto de incidência de descargas a meio de vão.

### 3.2.2 Descrição do Fenômeno e Cálculos Envolvidos

A fim de simplificar o problema em questão, considera-se que a linha possui somente um cabo pára-raios e que a incidência ocorreu exatamente a meio de vão. Não são considerados os acoplamentos entre o cabo de blindagem e as fases. Como exemplo, é considerada a linha na figura 3.2, e as respectivas impedâncias e tempos de propagação envolvidos são ilustradas na figura 3.3.

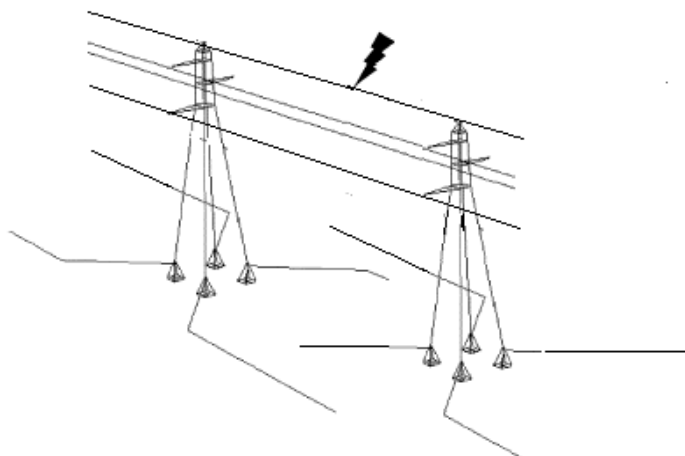


Figura 3.2: Ilustração de Incidência a Meio de Vão Considerada na Descrição do Fenômeno (adaptado (SOARES Jr, 2005))

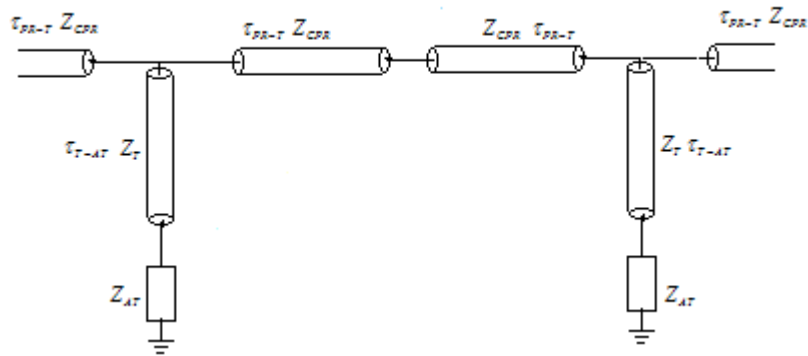


Figura 3.3: Impedâncias Envolvidas na Descrição do Fenômeno de Incidência a Meio de Vão

Na figura 3.3 os parâmetros  $Z_{CPR}$ ,  $Z_T$  e  $Z_{AT}$  representam a impedância de surto do cabo pára-raios e da torre e a impedância do aterramento respectivamente. Já os parâmetros  $\tau_{PR-T}$  e  $\tau_{T-AT}$  representam os tempos de propagação do ponto de incidência ao topo da torre e do topo da torre ao aterramento da mesma, respectivamente.

Como se pode observar na figura 3.4, no momento da incidência, a onda de corrente  $I$  se divide em duas parcelas iguais, que se propagam em direções opostas. Associada a cada onda de corrente que se propaga pelo cabo pára-raios,  $I_S$ , em ampères, propaga-se também uma onda de tensão,  $V_S$ , em volts, de valor igual ao produto da amplitude da onda de corrente pelo valor da impedância de surto  $Z_{CPR}$  do cabo pára-raios em condições de alta frequência, em ohms (equação 3.1):

$$V_S = Z_{CPR} \times I_S \tag{Eq. 3.1}$$

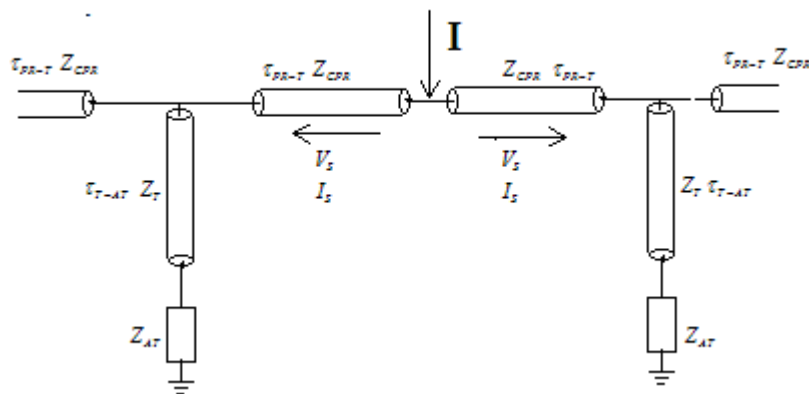


Figura 3.4: Propagação das Ondas de Tensão e Corrente após a Ocorrência de uma Incidência a Meio de Vão



A onda de tensão  $V_s$  se propaga ao longo do cabo pára-raios atingido, e gasta um tempo de propagação igual a  $\tau_{PR-T}$ , para se propagar entre o ponto de incidência e a torre. Decorrido esse tempo, a onda de tensão  $V_s$  encontra um ponto de descontinuidade da impedância de surto, que é a conexão do cabo pára raio com a torre de transmissão. Ao incidir sobre esse ponto, uma parcela da onda é refratada e outra parcela é refletida, retornando ao ponto de incidência da descarga (figura 3.5). Os coeficientes de reflexão,  $\Gamma_{RX}$ , e de refração,  $\Gamma_{RC}$ , neste ponto de descontinuidade são dados respectivamente pelas equações 3.2 e 3.3:

$$\Gamma_{RX} = \frac{Z_{T//CPR} - Z_{CPR}}{Z_{T//CPR} + Z_{CPR}} \quad \text{Eq. 3.2}$$

$$\Gamma_{RC} = \frac{2 \times Z_{T//CPR}}{Z_{T//CPR} + Z_{CPR}} \quad \text{Eq. 3.3}$$

Onde:

$$Z_{T//CPR} = \frac{Z_T \times Z_{CPR}}{Z_T + Z_{CPR}} \Omega$$

$Z_{CPR}$  é a impedância de surto do cabo pára-raios, em ohms;

$Z_T$  é a impedância de surto da torre, em ohms.

Utilizando-se os coeficientes acima, é possível obter os valores das parcelas da onda de tensão  $V_s$  refratada ( $V_T$ ) e refletida ( $V_{SR}$ ) no ponto de descontinuidade, conforme as equações 3.4 e 3.5, respectivamente, em volts. É importante destacar que a onda de tensão refratada  $V_T$  representa a parcela que desce a torre.

$$V_T = \Gamma_{RC} \times V_s \quad \text{Eq. 3.4}$$

$$V_{SR} = \Gamma_{RX} \times V_s \quad \text{Eq. 3.5}$$

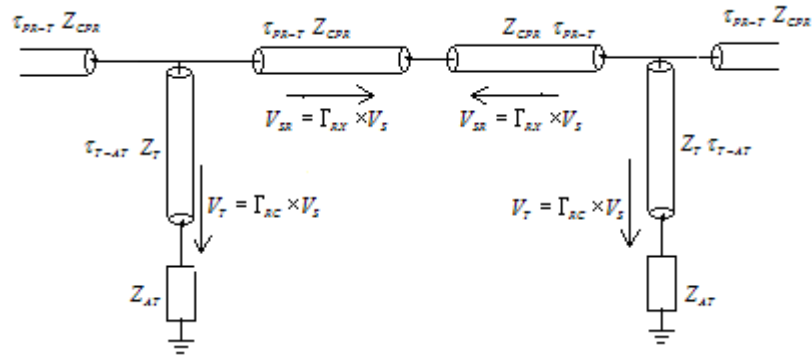


Figura 3.5: Ondas de Tensão Originadas no Ponto de Fronteira entre a Torre e o Cabo Pára-Raios

A onda de tensão refletida,  $V_{SR}$ , retorna ao ponto de incidência da descarga, após um tempo  $\tau_{PR-T}$ , que é o tempo de propagação do trecho entre o topo da torre e o ponto de incidência. Como no ponto de descontinuidade as impedâncias de surto da torre e do cabo pára-raios adjacente à torre estão em paralelo, uma onda de tensão igual a  $V_T$  além de continuar a se propagar pelo cabo pára-raios após a descontinuidade, também desce pela torre. Essa onda se propaga na torre por um tempo de propagação igual a  $\tau_{T-AT}$ , após o qual encontra um novo ponto de descontinuidade, que é a fronteira entre a torre e o aterramento da mesma, onde ocorrerá uma nova reflexão (figura 3.6). O coeficiente de reflexão  $\Gamma_{AT}$  na interface entre o aterramento e a torre é dado pela equação 3.6:

$$\Gamma_{AT} = \frac{Z_{AT} - Z_T}{Z_{AT} + Z_T} \quad \text{Eq. 3.6}$$

Onde:

$Z_{AT}$  é a impedância do aterramento, em ohms.

A partir da incidência de  $V_T$ , a parcela da onda refletida  $V_{AT}$  é dada pela equação 3.7, em volts:

$$V_{AT} = \Gamma_{AT} \times V_T \quad \text{Eq. 3.7}$$

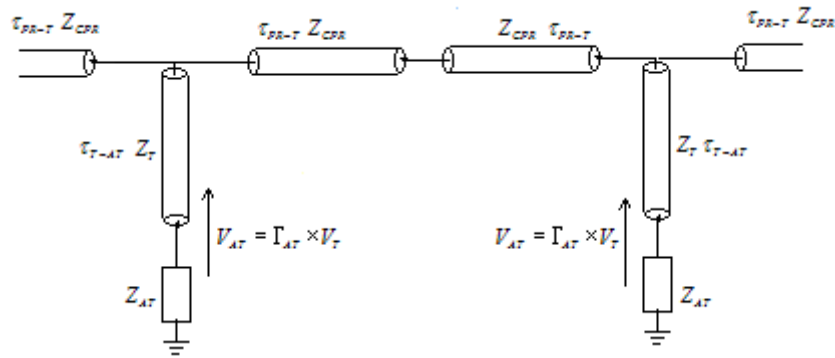


Figura 3.6: Ondas de Tensão Refletidas no Ponto de Fronteira entre a Torre e o Aterramento

Após um tempo igual a  $\tau_{T-AT}$ , a onda  $V_{AT}$  então se dirige ao topo da torre, onde encontra uma nova descontinuidade que é a fronteira entre a torre e os cabos pára-raios. Uma parcela de  $V_T$  será refratada e propagará até o ponto de incidência. O coeficiente de refração  $\Gamma_{TCPR}$  nesse ponto para uma onda que incide da torre para o aterramento é dado pela equação 3.8:

$$\Gamma_{TCPR} = \frac{Z_{CPR}}{Z_T + Z_{CPR} / 2} \tag{Eq. 3.8}$$

A parcela da onda de tensão refratada pode ser chamada de  $V_{TR}$  (figura 3.7) e se propaga até o ponto de incidência durante um tempo  $\tau_{PR-T}$  e é dada pela equação 3.9, em Volts:

$$V_{TR} = \Gamma_{TCPR} \times V_T \tag{Eq. 3.9}$$

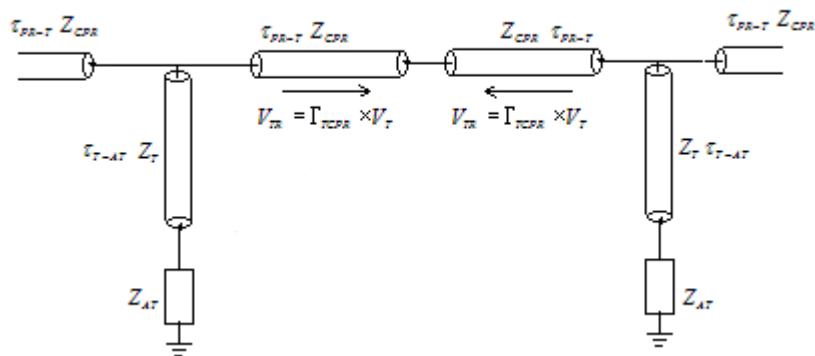


Figura 3.7: Ondas de Tensão Originadas pela Reflexão no Ponto entre a Torre e o Cabo Pára-Raios, após a Reflexão Ocorrida entre o Aterramento e a Torre

Com isso, têm-se dois aspectos relevantes, que vão influenciar diretamente no valor de sobretensão no ponto de incidência: o valor da primeira onda de tensão refletida,  $V_{SR}$ , e o valor da parcela da onda de tensão que é refratada da torre para o cabo pára-raios, vinda do aterramento,  $V_{TR}$ . Essas duas parcelas se propagarão de cada extremidade do vão até o ponto onde houve a incidência da descarga. Ao chegar nesse ponto, essas ondas serão responsáveis pelo decréscimo no valor de sobretensão naquele ponto. Ao todo, o valor tensão final  $V_F$  no ponto de incidência após a chegada das ondas  $V_{SR}$  e  $V_{TR}$  de ambas as extremidades é dada pela equação 3.10, em Volts. Usualmente, devido aos valores típicos dos coeficientes de reflexão, as ondas de tensão  $V_{SR}$  e  $V_{TR}$  são negativas para a primeira reflexão.

$$V_F = V_S + 2 \times V_{SR} + 2 \times V_{TR} \quad \text{Eq. 3.10}$$

É importante destacar particularmente a importância das primeiras ondas de tensão refletidas em cada torre adjacente, representadas por  $V_{SR}$ , que são determinantes para a redução ou interrupção do crescimento da frente da onda de tensão no ponto de incidência e, conseqüentemente, para que não ocorra disrupção entre o cabo pára-raios e o cabo fase mais próximo. Tal importância está no fato de que cada onda de tensão igual a  $V_{SR}$  possui um tempo total de propagação menor que as ondas de tensão iguais a  $V_{TR}$ , chegando primeiro ao ponto de incidência.

Para justificar tal afirmativa, pode-se considerar o tempo de propagação do ponto de incidência ao topo da torre igual a  $\tau_{PR-T}$  e o tempo de propagação entre o topo da torre e o aterramento seja igual a  $\tau_{T-AT}$ . O tempo que a onda de tensão  $V_{SR}$  leva para retornar ao ponto de incidência em relação ao instante em que ocorre a descarga pode ser chamado de  $\tau_{SR}$ . Este tempo representa o tempo de propagação de uma onda do ponto de incidência até o a interface entre a torre e o cabo pára-raios e desse ponto até retornar ao ponto de incidência após sofrer uma reflexão é dado pela equação 3.11, em segundos:

$$\tau_{SR} = 2 \times \tau_{PR-T} \quad \text{Eq. 3.11}$$

Já o tempo que a onda de tensão  $V_{TR}$  leva para retornar ao ponto de incidência pode ser chamado de  $\tau_{TR}$ , que é o tempo de propagação de uma onda do ponto de incidência ao ponto de descontinuidade e, uma vez refratado nesse ponto, desse pela torre, sendo refletido pelo ponto de aterramento para o topo da torre, seguindo então, após sofrer nova refração, até o ponto de incidência, dado pela equação 3.12, em segundos:

$$\tau_{TR} = 2 \times \tau_{PR-T} + 2 \times \tau_{T-AT} \quad \text{Eq. 3.12}$$

Portanto, o tempo total de propagação  $\tau_{SR}$  é menor que o tempo de propagação  $\tau_{TR}$  em  $2 \times \tau_{T-AT}$ , o que determina que a tensão refletida  $V_{SR}$  seja a primeira a chegar ao ponto de incidência reduzindo o valor da sobretensão nesse ponto. A onda de tensão  $V_{TR}$  chega  $2 \times \tau_{T-AT}$  segundos depois e também ajudará a reduzir a sobretensão naquele ponto.

Um aspecto importante a ser destacado é que, após as primeiras ondas de tensão refletida a chegarem ao ponto de incidência, novas refrações e reflexões vão ocorrer nas interfaces das torres adjacentes e os cabos pára-raios e também nos aterramentos das torres, o que faz com que a sobretensão resultante no ponto de incidência apresente um caráter oscilatório.

### ***3.3 Parâmetros de Influência no Desempenho da Linha frente a Descargas a Meio de Vão***

#### ***3.3.1 Introdução***

Neste item são citados os diversos parâmetros que influenciam no valor da tensão resultante e na probabilidade de ruptura do isolamento caso haja ocorrência de uma descarga a meio de vão. Os valores desses parâmetros determinam se haverá ou não ruptura do isolamento da linha, que poderá ocasionar o desligamento da mesma.

Tais grandezas podem ser divididas em dois grupos. O primeiro grupo possui as grandezas relacionadas à descarga incidente, que são a amplitude da corrente de descarga

e o tempo de frente da mesma, além do fato da descarga ser simétrica ou assimétrica. O segundo grupo envolve os parâmetros relacionados às características físicas da linha de transmissão, dentre os quais se destacam as distâncias mínimas entre os cabos pára-raios e os cabos fase, as impedâncias de surto e os tempos de propagação, os fatores de acoplamento e o raio equivalente dos cabos pára-raios devido ao efeito corona. A seguir, é detalhada a forma como esses parâmetros se relacionam de modo a influenciar na sobretensão resultante.

### ***3.3.2 As Impedâncias de Surto do Sistema e os Coeficientes de Reflexão***

No item 3.2 deste capítulo comentou-se a respeito da importância das reflexões chegarem rapidamente e com um valor apropriado ao ponto de incidência para que seja evitado que haja uma descarga a meio de vão. A primeira reflexão ocorre quando a onda de tensão parte do ponto de incidência e chega ao ponto de conexão da torre ao cabo pára-raios. A segunda reflexão se origina da interface entre a base da torre e o aterramento. Os coeficientes de reflexão associados às ondas citadas são dados respectivamente pelas equações 3.2 e 3.6.

Pela equação 3.2, pode-se verificar a importância do valor das impedâncias  $Z_{CPR}$  e  $Z_T$  para se obter um elevado coeficiente de reflexão negativa  $\Gamma_{RX}$ . O valor da combinação das impedâncias  $Z_{CPR}$  e  $Z_T$  em paralelo deve ser o menor possível, de modo a garantir um coeficiente de reflexão alto e negativo, resultando em um elevado valor  $\Gamma_{RX}$  de onda de tensão negativa que se propaga em direção ao ponto de incidência.

O coeficiente de reflexão  $\Gamma_{AT}$  dado pela equação 3.6 também deve ser negativo e ter o módulo mais elevado possível, para garantir que a onda de tensão refletida que chega ao ponto de incidência a partir do aterramento da torre tenha um valor elevado. Para que isso ocorra, tanto os valores das impedâncias  $Z_{AT}$  e  $Z_T$  não devem ser elevados. Entretanto, tais valores geralmente giram em torno de 200  $\Omega$  a 400  $\Omega$ .

No item 3.2 se considerou que a linha possuía apenas um cabo pára-raios. Em linhas

---

acima de 138 kV utilizam-se geralmente pelo menos dois cabos pára-raios a fim de proporcionar uma melhor blindagem para linha.

Caso haja dois ou mais cabos pára-raios, no instante em que a onda incidente chega à torre, a parcela de tensão refletida na primeira reflexão será maior, o que é benéfico na redução da sobretensão no ponto de incidência. Em caso de dois cabos pára-raios, o coeficiente de reflexão no ponto de descontinuidade de conexão entre a torre e os cabos pára-raios pode ser dado pela equação 3.13:

$$\Gamma'_{RX} = \frac{Z_{T//CPR2} - Z_{CPR}}{Z_{T//CPR2} + Z_{CG}} \quad \text{Eq. 3.13}$$

Onde:

$$Z_{T//CPR2} = \frac{\frac{Z_{CPR}}{2} \times Z_T}{\frac{Z_{CPR}}{2} + Z_T} \Omega$$

Ou seja, a tendência do coeficiente de reflexão neste ponto de descontinuidade é diminuir com o aumento do número de cabos pára-raios.

### ***3.3.3 A Suportabilidade a Meio de Vão e as Correntes de Pré-Descarga***

A fim de se verificar se haverá ou não uma disrupção, dada uma determinada sobretensão resultante da injeção de uma onda de corrente em um ponto a meio de vão no cabo pára-raios, deve-se calcular a suportabilidade do isolamento do espaçamento entre este cabo e o cabo fase mais próximo naquela região. Quando a sobretensão excede tal suportabilidade, um arco elétrico pode ocorrer entre os cabos.

Tal espaçamento é definido pela disposição dos cabos fase e cabos pára-raios na região a meio de vão, dependendo das distâncias verticais e horizontais entre os cabos. As distâncias horizontais são ditadas pela geometria da torre e, desprezando-se a influência dos ventos, não variam ao longo do vão. Já as distâncias verticais são definidas pelas

diferenças de altura dos cabos em relação ao solo. Sabe-se que geralmente a distância vertical dos cabos é diferente na torre e ao longo do vão, uma vez que, geralmente, as flechas dos cabos pára-raios são menores que as flechas dos cabos fase. As flechas são definidas como a diferença entre o valor da altura do cabo na torre e a altura do mesmo a meio de vão.

Pode-se concluir que os principais fatores que influenciam na distância de isolamento dos cabos são: a geometria da torre, responsável pelas distâncias horizontais e pela altura dos cabos na torre e também a flecha dos cabos, que variam em função do percentual da carga de ruptura que é aplicado aos mesmos de modo a tensioná-los. É importante ainda avaliar a necessidade de consideração da variação das flechas com a temperatura dos condutores. Tal variação pode ser considerável para grandes variações de carregamento das linhas.

O mecanismo de flashover entre condutores a meio de vão é considerado de grande complexidade devido às correntes de pré-descarga que aparecem durante o processo disruptivo. Na referência (WAGNER, 1963), Wagner e Hileman descreveram o fenômeno e observaram que quando uma onda impulsiva de tensão é aplicada a espaçamentos do tipo condutor-condutor, à medida que a tensão entre o cabo pára-raios e o cabo fase se aproxima do valor crítico de ruptura, após um curto intervalo de tempo uma corrente elevada passa a fluir. Tais correntes estão associadas ao crescimento de arcos ou canais luminosos ao longo dos cabos. Se a tensão aplicada for de alguma forma atenuada ou anulada antes dos canais se unirem ou obterem uma boa condutividade, a ruptura do isolamento é evitada. Os autores enfatizam a diferença entre correntes devido ao efeito corona e as correntes de pré-descarga aqui discutidas, relacionadas à formação dos canais disruptivos ao longo do cabo. As correntes devido ao corona são de baixa magnitude e de curta duração enquanto as correntes de pré-descarga são relativamente elevadas e ocorrem por quase todo o intervalo de disrupção.

Os autores do trabalho concluem que esse mecanismo seria capaz de retardar a ruptura suficientemente de forma a permitir que as reflexões negativas de torres adjacentes retornassem ao ponto de impacto a tempo de evitar que a disrupção do isolamento ocorresse. Uma ruptura a meio de vão seria, portanto, extremamente rara e seriam

---



necessárias correntes de descarga de amplitude elevada e tempos de frente bastante reduzidos.

Entretanto, os ensaios apresentados na referência (WAGNER, 1963) foram baseados em se aplicar impulsos padrão entre condutores simples ou tubos de aço. As influências de reflexões e refrações que ocorrem na interface entre a torre e os cabos pára-raios e entre a torre e o aterramento não foram levadas em conta. As formas de onda das sobretensões resultantes, que afetam diretamente a suportabilidade do espaçamento formado entre os condutores e possivelmente o fenômeno das correntes de pré-descarga, dependem fortemente das ondas refletidas. Como observado no próximo capítulo, tais sobretensões tem um caráter oscilatório, que se amortece após muitos ciclos e cujas características variam com o comprimento do vão e com o tempo de frente da descarga incidente.

Outro importante parâmetro não levado em conta nos ensaios é o efeito da geometria dos feixes de condutores. Tais feixes são concebidos de modo a aumentar o SIL (Potência Natural de Surto) de linhas de transmissão. Dois tubos de aço galvanizados ou mesmo dois condutores simples, dispostos em paralelo, utilizados em ensaios, não representam de forma precisa o espaçamento formado na prática entre feixes de condutores e cabos pára-raios. O fenômeno das correntes de pré-descarga, bem como a suportabilidade crítica do espaçamento deve ser diferente para cada caso.

Com isso, os resultados obtidos nos ensaios podem não representar corretamente as sobretensões resultantes de incidências a meio de vão, bem como o fenômeno de pré-descarga que ocorre na prática. Seriam necessárias novas séries de ensaios levando-se em conta a influência de torres e dos aterramentos, ou então se devem utilizar formas de onda de tensão não-padronizadas a serem aplicadas entre o cabo pára-raios e diversas configurações de feixes utilizadas na prática, a fim de se representar as sobretensões resultantes de incidências a meio de vão para linhas de transmissão convencionais e não-convencionais. Possivelmente, a metodologia de cálculo da suportabilidade do espaçamento, levando-se em conta os diversos parâmetros de influência citados, seria mais complexa.

---

Além disso, ainda que o fenômeno de ruptura a meio de vão não seja freqüente, o mesmo pode causar forte influência no desempenho de linhas acima de 230 kV, que possuem taxas de desligamento bastante reduzidas em relação à linhas de tensão de operação inferior.

Neste trabalho, no entanto, como uma primeira aproximação, são adotados os valores de suportabilidade crítica das referências (WAGNER, 1963) e (WAGNER, 1964), sem se considerar o efeito das correntes de pré-descarga na sobretensão resultante, o que é detalhado no Capítulo 4 desta dissertação.

### ***3.3.4 Os Tempos de Propagação e os Comprimentos das Torres e dos Vãos***

Como já foi discutido, algumas características físicas de linhas de tensão nominal acima de 230 kV as tornam susceptíveis a sofrerem desligamentos devido a descargas a meio de vão. Tais características são os vãos muito longos e também a altura das torres.

Os tempos de propagação das ondas de sobretensão ao longo das torres e dos cabos pára-raios definem se as reflexões chegarão ao ponto de incidência a tempo de se superporem à sobretensão naquele ponto e evitar que tal sobretensão chegue a um determinado valor que possa causar uma descarga entre o cabo pára-raios e o cabo fase mais próximo. Verificou-se que, de cada torre adjacente, há duas reflexões de onda de tensão importantes, uma que é refletida no ponto entre a torre e o cabo adjacente e outra que é oriunda de uma reflexão que ocorreu no ponto entre o aterramento e a torre, as quais foram chamadas de  $V_{SR}$  e  $V_{TR}$  respectivamente. A primeira a chegar ao ponto de incidência é a onda de tensão  $V_{SR}$ , pois seu percurso de propagação não envolve a torre, sendo reduzido em relação ao percurso de  $V_{TR}$ .

Para cada percurso, seja na torre ou nos cabos pára-raios, há um tempo de propagação envolvido. O tempo de propagação de cada meio, em segundos, pode ser definido de acordo com a equação 3.14.

$$\tau_m = \frac{X_m}{v_m} \quad \text{Eq. 3.14}$$

Onde:

$X_m$  é o comprimento total do percurso, em metros;

$v_m$  é a velocidade do meio em questão, em m/s.

A velocidade de propagação apresenta valores elevados para ambos os casos, da ordem do valor da velocidade da luz e é dependente dos parâmetros da linha.

Quanto maiores as distâncias e menores forem as velocidades nos percursos de propagação, maiores serão os tempos de trânsito. Sabe-se que tempos de propagação maiores implicam em maiores tensões resultantes, pois valores muito elevados são atingidos, dada a taxa de crescimento da onda de sobretensão, antes que a influência das ondas de tensão refletidas se faça sentir.

### ***3.3.5 Os Tempos de Propagação e o Tempo de frente da Onda de Corrente***

No item 3.3.4 destacou-se a importância do tempo de trânsito nos vãos e nas torres da linha. Tempos de propagação elevados implicam em demora na chegada das ondas de tensão refletida ao ponto de incidência. Esse fato se torna mais importante ainda quando se leva em conta o tempo de frente da onda de corrente.

Os parâmetros de tempo de frente da onda de sobretensão no ponto de incidência é o mesmo que o da onda de corrente, já que é dado pelo produto desta pela impedância de surto do cabo pára-raios. Quanto menor forem esses parâmetros, mais rápido o valor da onda de sobretensão aumentará, podendo atingir valores muito elevados capazes de provocar uma descarga a meio de vão, antes que as ondas refletidas cheguem a esse ponto. Por isso, vãos muito longos associados à descargas a meio de vão com tempos de frente muito curtos podem ser considerados fatores críticos para o desempenho da linha.

---

### ***3.3.6 A Impedância de Surto do Cabo Pára-Raios, a Amplitude da Onda de Corrente e o Efeito Corona***

Conforme detalhado no item 3.2 deste capítulo, após a descarga incidir sobre a linha, ela se divide em duas ondas de corrente iguais, cada uma se propagando em direção a uma torre adjacente. Associada a essa onda de corrente, tem-se uma onda de tensão  $V_s$  dada pela equação 3.1. Observando essa equação, fica claro que para um dado valor de impedância de surto da linha, quanto maior a amplitude da onda de corrente que se propaga na linha, maior será o valor da onda de sobretensão associada, o que aumenta a probabilidade de ruptura do isolamento entre o cabo pára-raios e o cabo fase mais próximo.

Entretanto, o valor da impedância de surto também varia durante o processo de crescimento do valor da sobretensão, tanto no cabo pára-raios, quanto nos cabos fase, devido ao acoplamento entre ambos. À medida que a sobretensão aumenta, um envelope de corona vai crescendo em torno dos condutores, nas regiões onde ocorrem tensões elevadas. Essa formação aumenta o raio equivalente dos condutores, o que implica em uma redução no valor das impedâncias de surto e ao mesmo um aumento no fator de acoplamento entre os cabos. Ambos os efeitos contribuem para reduzir a sobretensão resultante entre o cabo pára-raios e o cabo fase mais próximo.

### ***3.3.7 O Acoplamento entre os Cabos e a Sobretensão Resultante entre as Fases e os Cabos Pára-Raios***

No detalhamento do fenômeno de ruptura a meio de vão demonstrado no item 3.2, não se levou em conta o efeito dos acoplamentos entre o cabo pára-raios e as fases mais próximas. Devido à proximidade que existe entre tais cabos, o acoplamento é significativo, sendo tanto de natureza magnética quanto capacitiva. Entretanto, para a análise em foco, o efeito capacitivo é mais relevante quando se considera o efeito corona como é visto adiante (MACANN, 1947). Tal efeito se dá devido a sobretensão no cabo pára-raios, originada pela incidência de uma descarga no mesmo.

O fator de acoplamento capacitivo entre um cabo pára-raios e um cabo fase,  $K_{PR}$ , é dado

---

pela equação 3.15, cujas variáveis  $b$ ,  $a$ ,  $H$  e  $r$  são indicadas na figura 3.8(a) (MACANN, 1947).

$$K_{PR} = \frac{\log\left(\frac{b}{a}\right)}{\log\left(\frac{2 \times H}{r}\right)} \quad \text{Eq. 3.15}$$

Caso haja dois cabos pára-raios, o fator de acoplamento,  $K_{2PR}$ , é dado pela equação 3.16, cujas variáveis  $a$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $H$ ,  $r$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  são indicadas na figura 3.8(b) (MACANN, 1947).

$$K_{2PR} = \frac{\log\sqrt{\frac{b_1 b_2}{a_1 a_2}}}{\log\left(\frac{2 \times H}{\sqrt{ar}}\right)} \quad \text{Eq. 3.16}$$

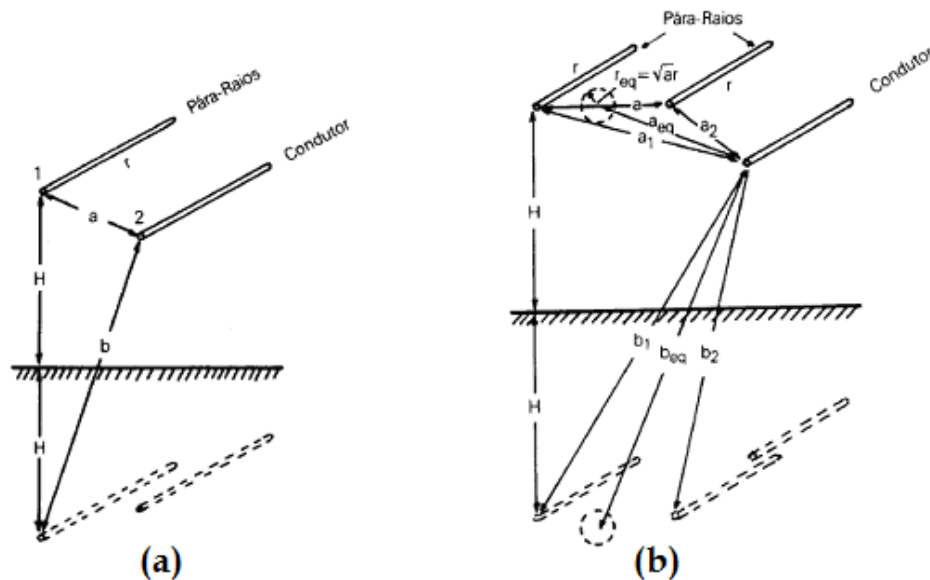


Figura 3.8: Parâmetros Necessários para o Cálculo dos Fatores de Acoplamento de Linhas (a) com um Cabo Pára-Raios e (b) com dois Cabos Pára-Raios (adaptado (MACANN, 1947))

### ***3.3.8 A Influência do Efeito Corona no Acoplamento e no Tempo de Propagação***

Como foi exposto anteriormente nesta dissertação, uma descarga que atinge um cabo pára-raios pode levar o mesmo a ter sobretensões muito elevadas. Essas sobretensões resultam na formação de um envelope de corona ao longo do cabo. Conseqüentemente, o raio equivalente do condutor também aumenta.

O envelope de corona modifica apenas a capacitância do condutor, tendo pouca influência no valor da indutância (WAGNER, 1955). Esse aumento acarreta na variação de três parâmetros importantes, no que tange as descargas a meio de vão: a alteração no fator de acoplamento entre o cabo pára-raios e o cabo fase, no valor da impedância de surto do cabo atingido e a redução na velocidade de propagação no cabo pára-raios.

Em (MACANN, 1947), foi discutido o efeito do envelope de corona sobre os fatores de acoplamento entre os cabos pára-raios e os cabos fase. Tais fatores foram medidos experimentalmente em função do potencial no cabo pára-raios, para algumas configurações de linhas de transmissão. Verificou-se que o efeito corona pode ser expresso em termos de um raio efetivo que substituirá o raio original do cabo pára-raios no cálculo dos parâmetros para fins de simulações. No artigo, diversas curvas foram apresentadas de modo a permitir a determinação deste raio. Essencialmente, o raio efetivo irá depender da altura do cabo pára-raios e da polaridade da tensão aplicada. O acoplamento mútuo com outro cabo pára-raios, caso este exista, também poderá influenciar, a depender da distância entre os cabos. Ao se considerar o efeito corona, o acoplamento entre o cabo pára-raios e o cabo fase é aumentado, reduzindo a diferença de potencial entre ambos e, conseqüentemente, reduzindo o risco de ruptura de isolamento.

A influência do efeito corona na velocidade de propagação é detalhada em (WAGNER, 1955). Com a presença do envelope de corona, o que ocorre basicamente é um retardo na propagação da onda de tensão, o que evidencia uma redução na velocidade de propagação. Desprezando as perdas, a velocidade de propagação é dada pela Equação 3.17:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L \times C}} \quad \text{Eq. 3.17}$$

Onde  $L$  e  $C$  é a indutância da linha por unidade de comprimento e a capacitância da linha por unidade de comprimento, respectivamente.

A Equação 3.17 ajuda a entender a influência do efeito corona sobre a velocidade de propagação. Sob o efeito de uma tensão elevada, acima do gradiente crítico, um envelope de corona se forma ao redor do cabo pára-raios, conferindo-lhe um acréscimo em seu raio total. Tal envelope confere um aumento no valor da capacitância do cabo, e tal aumento reduz a velocidade de propagação.

Uma redução de velocidade de propagação implica um no retorno da onda refletida ao ponto de incidência, possibilitando que a sobretensão naquele ponto alcance valores mais elevados antes que o efeito da onda refletida se faça sentir.

### ***3.3.9 A Influência das Descargas Simétricas e Assimétricas***

Quando uma descarga atinge um único cabo pára-raios e não há interrupção do isolamento com o cabo pára-raios adjacente, pode-se considerar que houve uma descarga assimétrica. Se os cabos estiverem muito próximos, caso haja uma incidência de descarga em um deles, poderá haver uma interrupção entre os cabos de modo que o fluxo da corrente de descarga percorra ambos. Em uma situação particular, a descarga poderá atingir, de forma simultânea, ambos os cabos. Pode-se considerar então que houve uma descarga simétrica nos cabos pára-raios. Sabendo que a sobretensão resultante é dada pelo produto da amplitude de corrente que percorre o cabo pela impedância de surto do mesmo, é esperado que tal fenômeno reduza consideravelmente as sobretensões resultantes se comparadas aos valores encontrados para descargas em apenas um cabo pára-raios (descarga assimétrica). Tal aspecto deve ser avaliado nos estudos de desempenho das linhas frente a descargas atmosféricas.

### ***3.4 Perspectivas de Aplicação dos Tópicos em Discussão***

Diante dos tópicos anteriores, fica evidenciado que um grande número de fatores pode influenciar na ocorrência da ruptura a meio de vão. Conforme já citado, a literatura tradicional relativa ao desempenho de linhas frente a descargas é relativamente pobre e não explora detalhadamente o tema, o que sugere a necessidade de uma avaliação inicial do fenômeno, envolvendo os diversos parâmetros de influência, através de simulações.

Portanto, o próximo capítulo é dedicado totalmente à avaliação da influência da ruptura a meio de vão em linhas típicas de 500 kV quanto ao seu desempenho frente a descargas atmosféricas, na expectativa de gerar, como uma primeira aproximação, resultados que permitam a realização de uma análise de sensibilidade do desempenho de tais linhas devido ao fenômeno.

---



# 4 Avaliação do Fenômeno de Ruptura a Meio de Vão em Linhas de 500 kV

## 4.1 Introdução

A partir de ferramentas computacionais, é possível modelar os parâmetros de linhas de transmissão, como cabos, torres e aterramentos, e as correntes de descarga. Partindo de tal modelagem, o fenômeno de incidência de descarga em qualquer ponto da linha pode ser simulado e as sobretensões resultantes podem ser obtidas. Através do programa de simulação de transitórios eletromagnéticos ATPDraw (PRIKLER, 2002), um membro da linha originada pelo EMTP (DOMMEL, 1986), tal modelagem foi realizada e, com isso, pôde-se simular incidências de descargas negativas, primeiras e subseqüentes, a meio de vão em linhas de 500 kV e obter as sobretensões resultantes. Programas tipo EMTP são utilizados como ferramenta de simulação de transitórios eletromagnéticos no mundo inteiro, realizando seus cálculos no domínio do tempo.

Neste capítulo são apresentadas análises dos fenômenos originados por descargas negativas ao longo da região a meio de vão em duas configurações típicas de linhas de

---

transmissão de 500 kV. As modelagens de parâmetros da linha e das correntes de descarga são detalhadas e discutidas. A partir das sobretensões originadas através de simulações de incidências ao longo de vãos de comprimentos variados, são calculados valores de corrente crítica ao longo do vão, ou seja, a corrente cuja amplitude apresenta um valor mínimo para que uma ruptura a meio de vão ocorra. O vão então é dividido em trechos, para os quais é assumida uma corrente crítica média e a respectiva probabilidade acumulada, a partir dos valores pontuais de corrente crítica. É estimado o número de descargas que atinge cada trecho do vão e, utilizando o valor de probabilidade acumulada correspondente ao valor de corrente crítica de cada trecho, calcula-se a taxa total de ruptura a meio de vão para cada comprimento de vão em estudo.

A influência do efeito corona e das descargas simétricas é estimada para fins de comparação e cálculo de taxa de ruptura a meio de vão. Os resultados para diversos comprimentos de vão são analisados, comparados e discutidos.

## ***4.2 Modelagem Utilizada nas Simulações***

Neste item é detalhada a modelagem dos diversos elementos da linha de transmissão e das correntes de descarga no programa ATPDraw.

### ***4.2.1 Modelagem das Linhas de Transmissão***

Linhas de transmissão apresentam diversas configurações de torres, feixes de subcondutores, comprimentos de vão e eletrodos de aterramento. Com isso, é esperado que haja para cada configuração uma dada suportabilidade do espaçamento entre o cabo fase e o cabo pára-raios a meio de vão, bem como diferentes sobretensões resultantes caso haja uma incidência de descarga naquela região.

Dada a enorme variedade de configurações atualmente utilizadas hoje no Sistema Interligado Nacional Brasileiro (SIN), nesta dissertação são simuladas e analisadas duas geometrias de torre típicas, que são apresentadas a seguir.

---

Na figura 4.1 é mostrada a torre convencional de 500 kV, circuito simples, amplamente utilizada no Setor Elétrico Brasileiro. Suas fases estão dispostas em feixes simétricos na horizontal, compostos de quatro sub-condutores GROSBEAK 636 MCM<sup>1</sup>, de alumínio com alma de aço, espaçados de 0,4 m . Como cabo pára-raios são utilizados dois cabos EHS<sup>2</sup> 3/8", classe C.

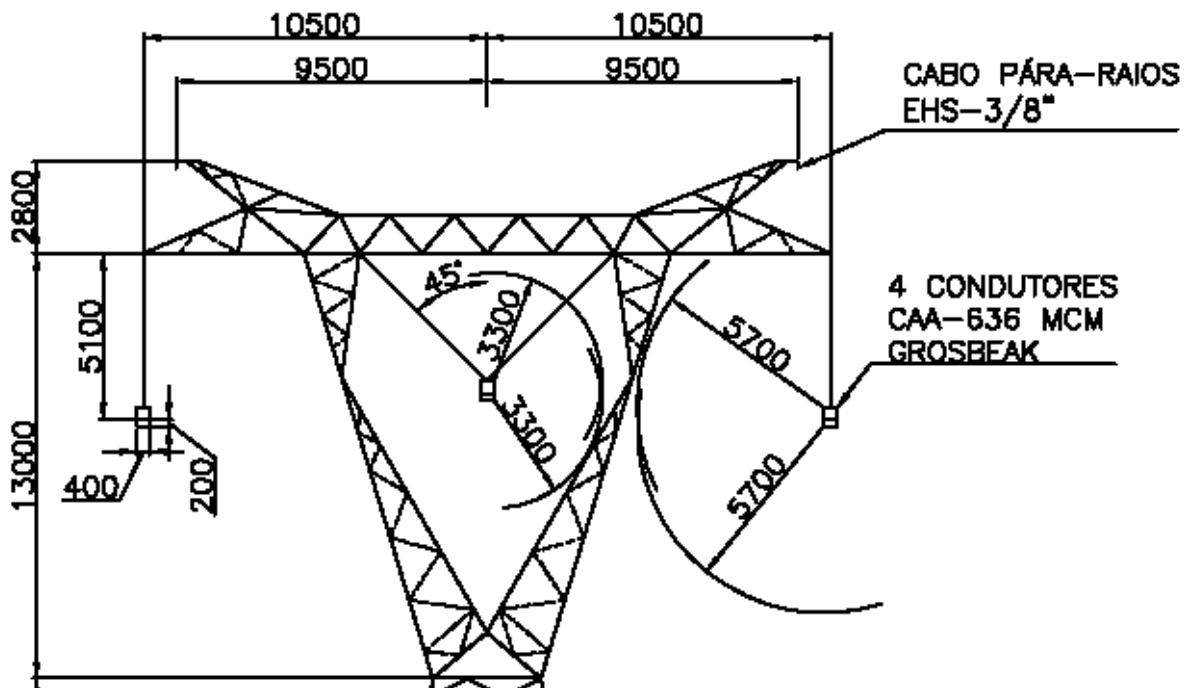


Figura 4.1: Cabeça da Torre Convencional, 500 kV

Na figura 4.2 tem-se a torre compacta tipo “raquete” de 500 kV, circuito simples, desenvolvida pela ELETRONORTE na década de 80 (FERNANDES, 1986). As fases têm disposição triangular, tipo delta, cujos feixes simétricos são compostos de sub-condutores RAIL 954 MCM espaçados de 0,457 m. Como cabo pára-raios são utilizados dois cabos EHS 3/8", classe C.

<sup>1</sup> 1 MCM é aproximadamente igual a 0,5067 mm<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Extra High Strength Steel Galvanizing ou Galvanização em aço com extra-alta resistência

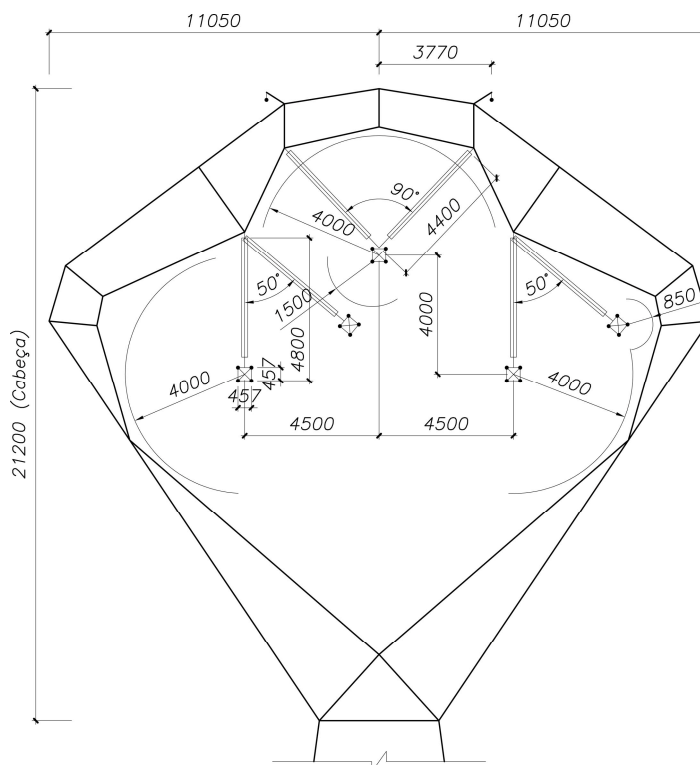


Figura 4.2: Cabeça da Torre Compacta Tipo “Raquete”, 500 kV

De modo a se calcular as flechas dos condutores, considera-se que o percentual da carga de ruptura horizontal dos cabos pára-raios a ser aplicado nos mesmos a fim de tracioná-los é de 10% a 12%, enquanto esse percentual para os cabos fase é igual a 20%. O percentual de carga de ruptura dos cabos pára-raios foi variado de modo a garantir que as flechas dos mesmos fosse aproximadamente 85% das flechas dos cabos fase. As flechas, assim como a altura das torres, são importantes parâmetros para o cálculo da suportabilidade do espaçamento entre o cabo pára-raios e o cabo fase mais próximo a meio de vão. A metodologia de cálculo de tais valores de suportabilidade é apresentada adiante no tópico 4.3.

Em relação aos parâmetros dos cabos pára-raios, foi considerada uma temperatura para o dimensionamento das flechas e o valor da resistência em corrente contínua igual a 33°C. Já para os cabos fase, a temperatura considerada foi de 50°C. As tabelas 4.1 e 4.2 mostram as características dos cabos e as respectivas flechas, nas temperaturas indicadas acima, para a torre convencional e a torre compacta respectivamente.

Tabela 4.1 – Dados Elétricos e Mecânicos dos Cabos Utilizados na Torre Convencional

Nome do cabo	Grosbeak					EHS 3/8"				
Tipo	CAA <sup>3</sup>					EHS Classe C				
Comprimento do Vão (m)	200	400	600	800	1000	200	400	600	800	1000
Flechas (m)	2,85	11,41	25,67	45,63	71,30	2,44	9,73	22,00	39,00	61,00
Relação entre a flecha do cabo pára-raios e do cabo fase	entre 0,85 e 0,86									
Seção do Cabo (mm <sup>2</sup> )	374,30					195,00				
Diâmetro Interno (cm)	0,93					0,00				
Diâmetro Externo (cm)	2,51					0,91				
Carga de Ruptura (kgf)	11410,60					6990				
Resistência em CC <sup>4</sup> (Ω)	0,101					3,36				
Percentual da Carga de Ruptura Aplicado	20%					12%				

Tabela 4.2 – Dados Elétricos e Mecânicos dos Cabos Utilizados na Torre Compacta Tipo “Raquete”

Nome do cabo	Rail					EHS 3/8"				
Tipo	CAA					EHS Classe C				
Comprimento do Vão (m)	200	400	600	800	1000	200	400	600	800	1000
Flechas (m)	3,39	13,54	30,47	54,16	84,63	2,91	11,62	26,15	46,50	72,65
Relação entre a flecha do cabo pára-raios e do cabo fase	entre 0,85 e 0,86									
Seção do Cabo (mm <sup>2</sup> )	517,40					195,00				
Diâmetro Interno (cm)	0,74					0,00				
Diâmetro Externo (cm)	2,96					0,91				
Carga de Ruptura (kgf)	11838,9					6990				
Resistência em CC (Ω)	0,069					3,36				
Percentual da Carga de Ruptura Aplicado	20%					10%				

Para ambas as configurações de torre, a altura mínima da estrutura é de 36 metros, variando com o comprimento do vão de modo a respeitar a distância mínima entre os cabos fase mais baixos e o solo, que é igual a 10 m. Nas simulações foram considerados comprimentos de vão entre 200 m e 1000 m. Na prática as torres aqui apresentadas geralmente são utilizadas para vão de, no máximo, 800 m de comprimento. Para vãos acima deste valor, são necessários projetos de torres especiais, destinadas a longas travessias (KIESSLING, 2008). A título de comparação, foi considerado um valor máximo de comprimento de vão igual a 1000 m. A partir dos dados apresentados para cada configuração, calcula-se a altura da torre para todos os vãos, sempre se respeitando os limites de altura mínima entre os cabos fase e o solo e a altura mínima da torre. A tabela 4.3 fornece as alturas de torres de todos os vãos considerados nas simulações para a torre

<sup>3</sup> CAA – Cabo de Alumínio com Alma de Aço

<sup>4</sup> CC – Corrente Contínua

convencional e a torre compacta.

Tabela 4.3 – Alturas das Torres e Distâncias Mínimas dos Cabos Fase e o Solo

Tipo de Torre		Vão (m)				
		200	400	600	800	1000
Convencional	Altura da Torre (m)	36,00	36,00	44,77	64,73	90,40
	Distância Mínima entre os Cabos Fase e o solo (m)	24,05	15,49	10,00	10,00	10,00
Compacta	Altura da Torre (m)	36,00	36,00	49,70	73,38	103,86
	Distância Mínima entre os Cabos Fase e o solo (m)	23,84	13,23	10,00	10,00	10,00

Dada a geometria e as características dos cabos fase e dos cabos pára-raios, é necessário escolher a modelagem adequada ao estudo em questão. Devido às componentes de alta frequência associadas aos fenômenos decorrentes de descargas atmosféricas, além da representação precisa do fenômeno de propagação através do uso de parâmetros distribuídos e o acoplamento entre os cabos, é necessário levar-se em conta a variação dos mesmos com a frequência. Com isso, a modelagem desenvolvida por J. Marti (MARTI, 1982) foi utilizada neste trabalho a fim de se modelar os vãos da linha.

Através da modelagem desenvolvida por J. Marti e implementada no ATPDraw, matrizes de parâmetros elétricos dentro de uma faixa de frequências definida pelo usuário são calculadas. A matriz de transformação modal é fixa e determinada pela frequência fornecida pelo usuário, o que se configura como a principal limitação do modelo, já que tal matriz permite que haja uma diagonalização perfeita apenas para matrizes de elementos calculados naquela mesma frequência. As matrizes de elementos calculados em outras frequências, após sofrerem a transformação modal, apresentam resíduos pequenos fora da diagonal principal, que são automaticamente desprezados pela rotina implementada. Além disso, os elementos imaginários da matriz de transformação podem ser desprezados, tornando-a uma matriz real. Em linhas desbalanceadas, tais resíduos podem não ser desprezíveis, o que afeta os resultados.

Uma vez que as simulações ocorrem no domínio do tempo, após a transformação modal,

tais matrizes resultantes, que estão no domínio da frequência, têm seus elementos aproximados por funções polinomiais racionais do domínio de Laplace. Tais funções são reescritas na forma de uma soma de frações parciais que, finalmente, podem ser convertidas em uma série de conexões R-C em série.

Nesta dissertação, a frequência da matriz de transformação escolhida foi 200 kHz para primeiras descargas e 1 MHz para descargas subseqüentes, o que corresponde aos limites superiores das componentes de frequência das ondas típicas destas descargas (VISACRO, 2005). A faixa de frequências utilizada no cálculo dos parâmetros das linhas foi de 10 Hz a 10 MHz.

Outros itens relevantes quanto ao cálculo dos parâmetros elétricos das linhas de transmissão que estão disponíveis na rotina são o efeito pelicular, que foi levado em consideração nas simulações, e também a resistividade do solo, assumindo um valor igual a  $1000 \Omega \cdot m$ . Os dados dos sub-condutores também devem ser informados (a qual fase pertence, resistência DC por quilômetro, raios interno e externo e coordenada horizontal e vertical do cabo na torre e a altura dos mesmos a meio de vão). A figura 4.3 (a) e (b) ilustra um exemplo de entrada de dados do modelo J. Marti, para a torre compacta e um vão de 400 m.

The image shows a software configuration window with the following settings:

- System type:** Overhead Line (dropdown), #Ph: 5 (spin box)
- Options:**
  - Transposed
  - Auto bundling
  - Skin effect
  - Segmented ground
  - Real transf. matrix
- Units:**
  - Metric
  - English
- Standard data:**
  - Rho [ohm\*m]: 1000
  - Freq. init [Hz]: 10
  - Length [km]: 0.04
  - Set length in icon
- Model Type:**
  - Bergeron
  - PI
  - JMarti
  - Semlyen
  - Noda
- Data:**
  - Decades: 7
  - Points/Dec: 10
  - Freq. matrix [Hz]: 250000
  - Freq. SS [Hz]: 60
  - Use default fitting

(a)

	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]
1	1	0.24638	1.4796	0.069598	-4.729	30	10
2	1	0.24638	1.4796	0.069598	-4.729	30.457	10.457
3	1	0.24638	1.4796	0.069598	-4.272	30.457	10.457
4	1	0.24638	1.4796	0.069598	-4.272	30	10
5	2	0.24638	1.4796	0.069598	-0.229	34	14
6	2	0.24638	1.4796	0.069598	-0.229	34.457	14.457
7	2	0.24638	1.4796	0.069598	0.229	34.457	14.457

(b)

Figura 4.3: Exemplo de Entrada de Dados para a Modelagem da Geometria dos Cabos no ATPDraw: (a) Dados do modelo a ser Utilizado e (b) Dados Elétricos e de Configuração Geométrica dos Cabos

As torres de transmissão foram consideradas como linhas de transmissão verticais sem perdas, cuja modelagem foi elaborada a partir de parâmetros distribuídos constantes com a frequência. Um valor típico de impedância de surto igual a  $300 \Omega$  foi adotado para cada torre. A velocidade de propagação foi considerada igual a 85% da velocidade da luz (IEEE, 1993). Para um cálculo da impedância de surto mais preciso, seriam necessárias metodologias mais complexas envolvendo modelagem eletromagnética (SOARES Jr, 2002).

Quanto à impedância de aterramento, foi considerada uma resistência concentrada igual a  $17 \Omega$  no pé de cada torre. Esta representação tem resultado semelhante a outras representações mais complexas de impedâncias de aterramento em termos das sobretensões resultantes a meio de vão, se o módulo da impedância tem o mesmo valor da resistência concentrada.

A tensão nominal da linha nos cabos fase não foi incluída nas simulações. No entanto, o valor instantâneo desta tensão pode influenciar na probabilidade de ocorrência da ruptura a meio de vão.

A título de comparação, são apresentados nesta dissertação resultados levando-se em consideração o efeito corona. Para isso, são utilizadas as equações 4.1 e 4.2, a fim de calcular um raio equivalente a ser implementado no ATPDraw nos cabos pára-raios e nas fases do



vão no qual a corrente de descarga é injetada, em função dos valores de tensão máximos obtidos nesses cabos através da injeção da corrente crítica, calculada sem a presença do efeito corona, considerando a descarga simétrica ou assimétrica. A partir dessa modelagem, é possível calcular um novo valor de corrente crítica, desta vez levando-se em conta o efeito corona.

A referência (EPRI, 1982) oferece a equação 4.1 para o cálculo do Raio Máximo de Corona,  $R_C$ , em metros:

$$R_C \ln\left(\frac{2h}{R_C}\right) = \frac{V}{E_0} \quad \text{Eq. 4.1}$$

Onde:

$$h_{med} = h_t - \frac{2}{3} \times f_{cond}$$

$h_t$  é a altura do condutor ou do feixe de sub-condutores na torre;

$f_{cond}$  é a flecha do condutor do ou dos sub-condutores que compõem o feixe;

$V$  é a tensão máxima aplicada ao cabo, em kV;

$E_0$  é o gradiente de corona do cabo, em kV/m.

A referência (BROWN, 1978) sugere um valor de  $E_0$  igual a 1500 kV/m para cabos pára-raios e cabos fase e o mesmo é usado em todas as representações envolvendo o efeito corona nesta dissertação.

Como se trata de resolução de uma equação não-linear é necessária a utilização de algum método numérico para a resolução da mesma. O método de Newton-Raphson pode ser uma forma rápida e precisa de se obter  $R_C$  iterativamente. Tal método é utilizado para encontrar raízes de equações algébricas não lineares, baseando-se na linearização sucessiva da função a partir de uma condição inicial (BARROSO, 1983).

Porém, tal raio de corona não representa o raio efetivo ( $R_{ef}$ ) a ser utilizado nos cálculos de impedância de surto e de fator de acoplamento, bem como em simulações em programas de transitórios. O fator de acoplamento efetivo é dado pela média geométrica dos efeitos de acoplamento com e sem corona (EPRI, 1982). O raio efetivo  $R_{ef}$  a ser usado nas simulações é dado pela Equação 4.2.

$$R_{ef} = \exp \left( \ln 2h - \sqrt{\left( \ln \frac{2h}{r} \right) \times \left( \ln \frac{2h}{r + R_c} \right)} \right) \quad \text{Eq. 4.2}$$

Onde  $r$  é o raio externo do condutor simples ou do raio equivalente do feixe de sub-condutores.

Em caso de um feixe de sub-condutores como costumam serem constituídas as fases de muitas linhas, deve-se reduzir o feixe de sub-condutores a um condutor equivalente simples de raio  $R_{eq}$  (Equação 4.3) e utilizar o mesmo no lugar de  $r$  na Equação 4.3:

$$R_{eq} = \sqrt[N]{r_{11} r_{12} r_{13} \dots r_{1n}} \quad \text{Eq. 4.3}$$

Onde  $r_{11}$  é o raio do sub-condutor 1,  $r_{1n}$  é a distância do condutor 1 ao condutor  $n$  e  $N$  é o número de sub-condutores.

Na prática, o raio de corona não é fixo e cresce em função da variação da tensão no cabo ao longo do tempo causando, conseqüentemente, uma variação da impedância de surto e da velocidade de propagação do cabo. É importante destacar que se deve tomar certo cuidado ao se utilizar o valor do raio efetivo a fim de se calcular ou simular o fenômeno e os efeitos da formação do envelope de corona, já que se trata apenas de uma aproximação. Para um cálculo mais preciso, seria necessário levar em conta a dinâmica do processo de formação do envelope de corona e do crescimento da tensão no cabo ao longo do tempo.

O vão principal, onde se encontra o ponto de incidência de descarga, foi seccionado em dez partes, de modo a permitir a medição das tensões entre o cabo pára-raios e a fase mais

próxima ao longo do seu percurso e ainda variar o ponto de incidência da descarga. Em cada lado do vão principal foram representados quatro vãos adjacentes e as respectivas torres. Ao final dos quatro vãos adjacentes, foi inserida uma longa terminação de modo a evitar que reflexões naquele ponto possam vir a afetar as sobretensões resultantes. A figura 4.4 ilustra uma configuração de um vão principal de 400 m com as respectivas torres e vãos adjacentes, para fins de simulação.

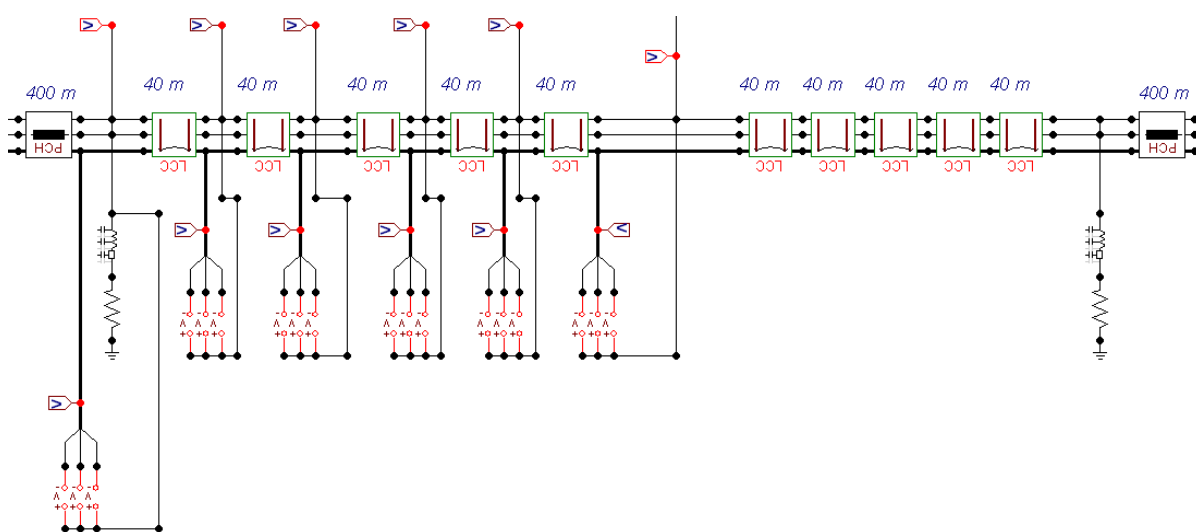


Figura 4.4: Exemplo de Montagem dos Vãos Implementada no ATPDraw

### 4.2.2 Modelagem das Correntes de Retorno

A necessidade de se obter precisamente os valores máximos e as formas de onda das sobretensões resultantes em decorrência de incidências de descarga faz necessária a correta modelagem da forma de onda da corrente de retorno. Formas de onda que não representem bem o fenômeno podem levar a resultados incorretos e sem qualquer validade (SOARES Jr, 2005). Como indicado pela referência (ANDERSON, 1980), a frente de uma onda típica de descarga pode ser caracterizada através dos parâmetros indicados na Figura 4.5, onde:

$T_{10}$  é o tempo necessário para a amplitude da corrente crescer de  $0,1I_{p1}$  para  $0,9I_{p1}$ ;

$T_{30}$  é o tempo necessário para a amplitude da corrente crescer de  $0,3I_{p1}$  para  $0,9I_{p1}$ ;

$S_{10}$  é a inclinação da reta que liga  $0,1I_{p1}$  a  $0,9I_{p1}$ ;

$S_{30}$  é a inclinação da reta que liga  $0,3I_{p1}$  a  $0,9I_{p1}$ ;

$I_{p1}$  é a amplitude do primeiro pico;

$I_{p2}$  é a amplitude do segundo pico;

$di/dt_{max}$  é a máxima inclinação da frente da onda.

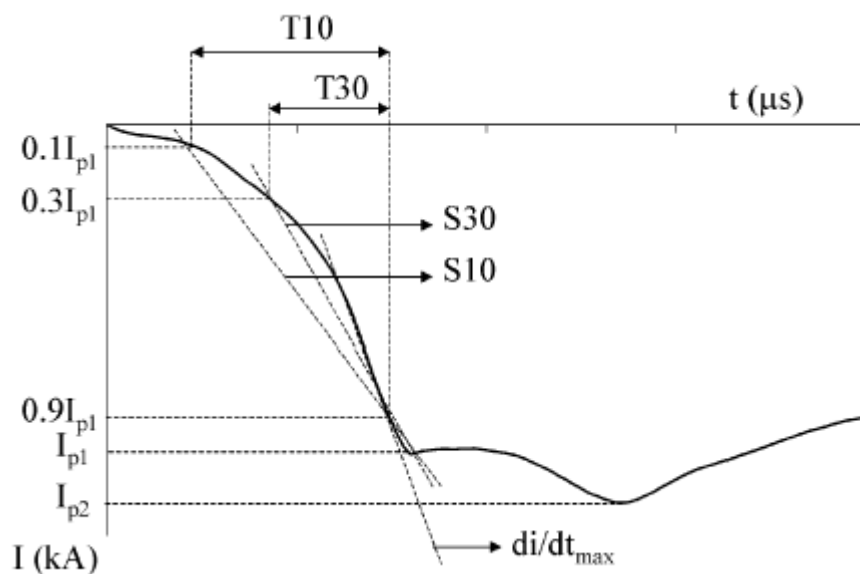


Figura 4.5: Parâmetros Típicos de Ondas de Corrente de Retorno (adaptado (ANDERSON, 1980))

A literatura tradicional sugere que a onda de corrente de retorno seja representada pela dupla exponencial. Tal representação constitui-se de duas formas de onda exponenciais de sinais contrários e constantes de tempo diferentes. A facilidade de geração e variação de parâmetros desse tipo de onda em laboratórios, através de circuitos envolvendo o ajuste de capacitâncias e resistências, a fez muito usual em ensaios experimentais de desempenho de equipamentos e materiais frente a surtos decorrentes de descargas atmosféricas. Em muitos trabalhos que envolvem simulações computacionais, principalmente em estudos de transitórios eletromagnéticos, é injetada uma corrente em forma de dupla rampa no ponto de incidência. No entanto tanto a dupla rampa quanto a dupla exponencial não conseguem refletir as características típicas de ondas reais de corrente de descarga.

A dupla rampa é a representação mais simplista, já que consiste apenas em se utilizar uma rampa crescente até o pico da onda de corrente e outra decrescente de modo que no tempo de meia onda essa rampa tenha atingido a metade do valor de pico.

A dupla exponencial não consegue reproduzir a natureza côncava da frente da onda observada em curvas reais de corrente de descarga e sua derivada máxima ocorre no início da onda, enquanto que as ondas reais apresentam derivada máxima próxima ao pico. Tais divergências são importantes e fazem com que a injeção da onda de corrente representada pela dupla exponencial resulte em sobretensões pouco representativas e muito diferentes daquelas geradas por ondas reais.

Entretanto, uma nova metodologia de representação da corrente de retorno mostra-se mais adequada para análises computacionais. A função analítica de Heidler (HEIDLER, 1985) permite representar adequadamente curvas médias de corrente, obtidas a partir de dados obtidos em medições diretas em torres instrumentadas, sendo possível obter formas de onda bem próximas das ondas de corrente de descarga reais.

A partir da função de Heidler, é possível representar a natureza côncava da onda de corrente de descarga no início da frente da onda, a derivada máxima próxima ao pico e ainda o decaimento da amplitude após a ocorrência do pico. Tal função é dada pela equação 4.4:

$$F(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} \exp(-t/\tau_2) \quad \text{Eq. 4.4}$$

Onde:

$I_0$  é a amplitude da corrente na base do canal;

$\tau_1$  é a constante relacionada ao tempo de frente da onda de corrente;

$\tau_2$  é a constante relacionada ao tempo de decaimento da onda de corrente;

$$\eta = \exp[-(\tau_1/\tau_2)(n \times \tau_2/\tau_1)^{1/n}]$$

$n$  é um expoente de ajuste.

A corrente de descarga será composta de uma soma de funções de Heidler, dada pela equação 4.5:

$$i(t) = \sum_{k=1}^m \frac{I_{0k}}{\eta_k} \frac{(t/\tau_{1k})^{n_k}}{1 + (t/\tau_{1k})^{n_k}} \exp(-t/\tau_{2k}) \quad \text{Eq. 4.5}$$

Onde:

$m$  é igual ao número de funções de Heidler a serem somadas a fim de formar a onda de corrente de descarga

$$\eta_k = \exp[-(\tau_{1k} / \tau_{2k})(n \times \tau_{2k} / \tau_{1k})^{1/n_k}]$$

Utilizando a soma de diversas funções de Heidler, é possível representar primeiras descargas e subseqüentes, com os valores medianos de seus parâmetros indicados na figura 4.5, incluindo, além da concavidade da frente de onda e a derivada máxima próxima ao pico, os múltiplos picos presentes nas primeiras descargas, que segundo a referência (VISACRO, 2004), se apresenta como a representação mais adequada para ondas típicas deste tipo. Enquanto as primeiras descargas são representadas através da soma de seis ou sete funções de Heidler, a representação das descargas subseqüentes necessita da soma de apenas duas funções (DE CONTI, VISACRO, 2007).

Nesta referência, de modo a se obter formas de onda de corrente de retorno de primeiras descargas e subseqüentes, cada parâmetro de cada função de Heidler foi ajustado de modo que a soma das funções representasse uma forma de onda de corrente impulsiva com os mesmos valores medianos de parâmetros oriundos de medições de correntes negativas de descarga descendente da estação do Monte San Salvatore (ANDERSON, 1980). Nesta dissertação, tais funções foram adaptadas de forma a obter novas formas de onda, com amplitude de 1 kA, com os mesmos parâmetros de tempo. As figuras 4.6 e 4.7 mostram as formas de onda obtidas para primeiras descargas e descargas subseqüentes respectivamente. As tabelas 4.4 e 4.5 indicam os parâmetros utilizados nas funções de Heidler a fim de sintetizar as formas de onda de corrente de primeira descarga e descarga subseqüente respectivamente

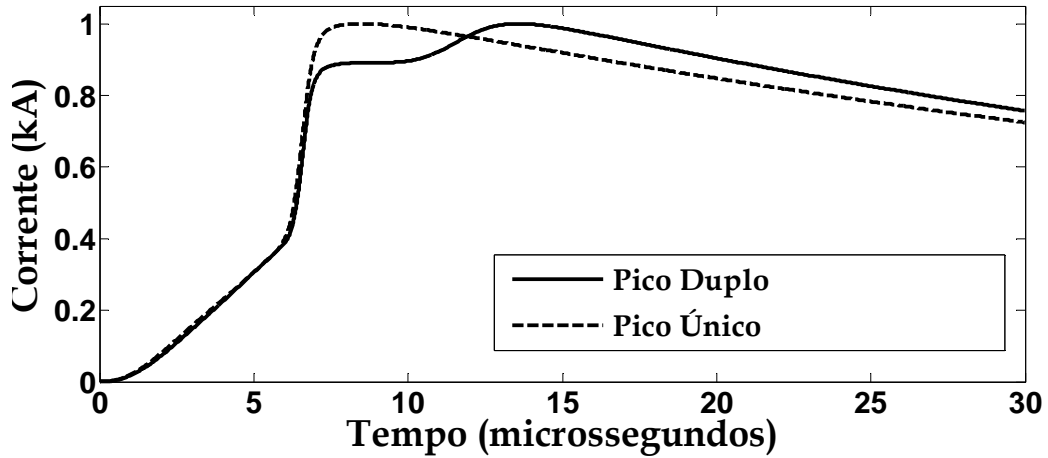


Figura 4.6: Formas de Onda de Primeira Descarga Utilizadas nas Simulações no ATPDraw.

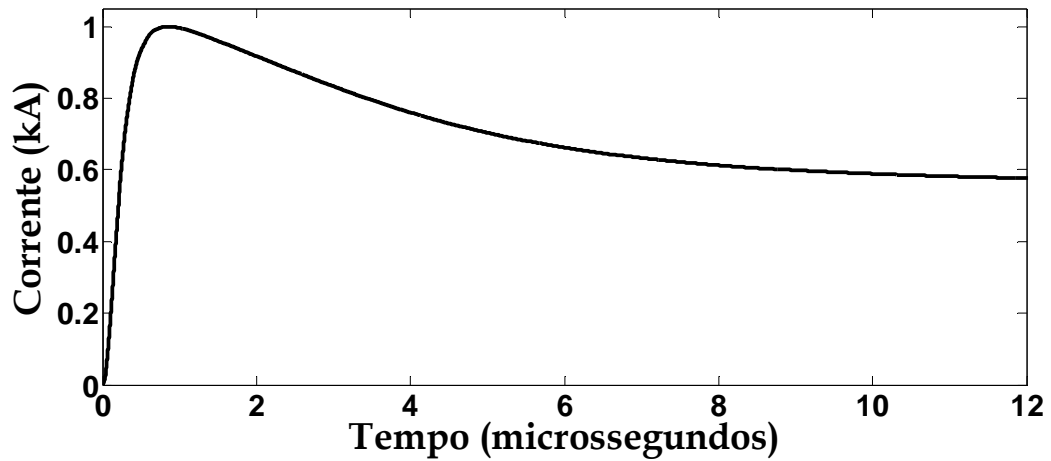


Figura 4.7: Formas de Onda de Descargas Subseqüentes Utilizadas nas Simulações no ATPDraw.

Tabela 4.4: Parâmetros Utilizados para a Obtenção das Curvas de Corrente de Primeira Descarga de Pico Único e Pico Duplo

k	Primeira Descarga com Pico Único				Primeira Descarga com Pico Duplo			
	$I_{0k}$ (A)	$n_k$	$\tau_{1k}$ ( $\mu$ s)	$\tau_{2k}$ ( $\mu$ s)	$I_{0k}$ (A)	$n_k$	$\tau_{1k}$ ( $\mu$ s)	$\tau_{2k}$ ( $\mu$ s)
1	90,32	2	1,2	100	96,77	2	3	76
2	154,84	3	3	100	145,16	3	3,5	25
3	93,55	5	4,8	25	96,77	5	5,2	20
4	132,26	7	6	60	122,58	7	6	60
5	538,71	36	6,6	44	438,71	44	6,6	60
6	354,84	2	100	600	354,84	2	100	600
7	-	-	-	-	183,87	15	11,7	48,5

Tabela 4.5: Parâmetros Utilizados para a Obtenção da Curva de Corrente de Descarga Subsequente

k	Descarga Subsequente			
	$I_{0k}$ (A)	$n_k$	$\tau_{1k}$ ( $\mu$ s)	$\tau_{2k}$ ( $\mu$ s)
1	891,67	2	3	76
2	541,67	3	3,5	25

As tabelas 4.6 e 4.7 mostram um comparativo entre as formas de onda utilizadas nas simulações baseadas nos parâmetros das funções de Heidler indicadas em (DE CONTI, 2007) com os parâmetros medianos obtidos na Estação do Monte San Salvatore para as primeiras descargas e as descargas subsequentes respectivamente. Pode-se notar que, apesar da modificação das amplitudes a fim de que o pico máximo fosse igual a 1 kA, os principais parâmetros de tempo obtidos apresentaram valores satisfatórios e coerentes.

Tabela 4.6: Comparação entre os Valores Medianos obtidos na Estação do Monte San Salvatore com os Parâmetros de Tempo das Curvas da Figura 4.6 para as Primeiras Descargas

Dados	$I_{p1}$ (kA)	$I_{p2}$ (kA)	$T_{10}$ ( $\mu$ s)	$T_{30}$ ( $\mu$ s)
Parâmetros Medianos (ANDERSON, 1980)	27,7	31,1	4,5	2,3
Curvas Fig. 4.6	0,89	1	4,6	2,3

Tabela 4.7: Comparação entre os Valores Medianos obtidos na Estação do Monte San Salvatore com os Parâmetros de Tempo das Curvas da Figura 4.7

Dados	$I_{p1}$ (kA)	$I_{p2}$ (kA)	$T_{10}$ ( $\mu$ s)	$T_{30}$ ( $\mu$ s)
Parâmetros Medianos (ANDERSON, 1980)	11,8	--	0,6	0,4
Curvas Fig. 4.7	1,0	--	0,5	0,3

A título de comparação, primeiras descargas foram sintetizadas apresentando pico duplo ou pico único. Quando representada com dois picos, as primeiras descargas são capazes de representar melhor a forma das descargas típicas obtidas através de medições.



Entretanto, não há muitos dados estatísticos que descreva o tempo de ocorrência do segundo pico.

A representação e as simulações envolvendo formas de onda de corrente de descargas subseqüentes se fazem importante, pois, apesar das amplitudes desse tipo de descargas serem geralmente inferiores à da primeira descarga, o tempo de frente da onda costuma ser bastante inferior. Como já discutido no Capítulo 3, frentes de onda muito rápidas, associadas a vãos muito extensos podem gerar sobretensões importantes, ainda que a amplitude da onda de corrente seja baixa.

### ***4.3 Cálculo da Suportabilidade a Meio de Vão***

Dada certa configuração de torre e as respectivas flechas dos cabos da linha, tem-se as distâncias horizontais e verticais, ilustradas nas figuras 4.8 e 4.9, que permitem cálculo do espaçamento entre os cabos fase e o cabo pára-raios a meio de vão,  $D_{ISOL}$ , pela equação 4.6, em metros:

$$D_{ISOL} = \sqrt{(x_{CPR} - x_{CF})^2 + (h_{CPR} - h_{CF})^2} \quad \text{Eq. 4.6}$$

Onde:

$x_{CPR}$  é a distância horizontal do cabo pára-raios ao eixo vertical da torre, em metros;

$x_{CF}$  é a distância horizontal do cabo fase ao eixo vertical da torre, em metros;

$h_{CPR}$  é a altura do cabo pára-raios em relação ao ponto de incidência, em metros;

$h_{CF}$  é a altura do cabo fase em relação ao ponto de incidência, em metros.

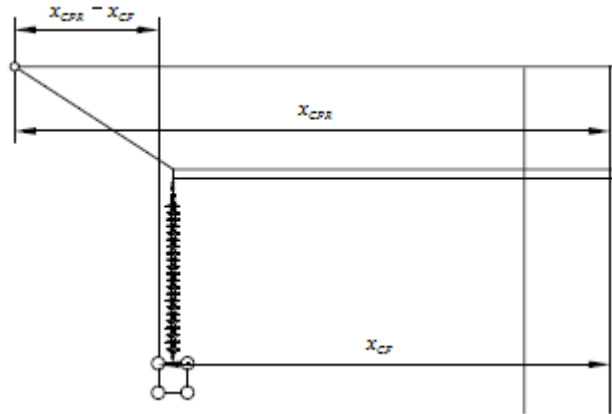


Figura 4.8: Distâncias Horizontais a Serem Consideradas no Cálculo da Distância de Isolamento entre os Cabos Fase e o Cabo Pára-Raios a Meio de Vão. Representação na Torre

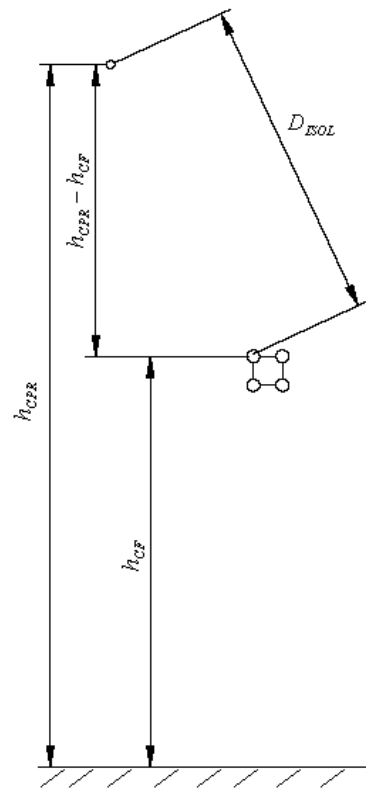


Figura 4.9: Distâncias Verticais a Serem Consideradas no Cálculo da Distância de Isolamento entre os Cabos Fase e o Cabo Pára-Raios a Meio de Vão. Representação no Meio do Vão

A partir da equação 4.6, é possível obter o espaçamento mínimo de isolamento a meio de vão, que é a menor distância entre os cabos fase e o cabo pára-raios a meio de vão para a torre convencional e a torre compacta. A figura 4.10 mostra os espaçamentos mínimos a meio de vão entre o cabo pára-raios e os cabos fase, em função do comprimento do vão.

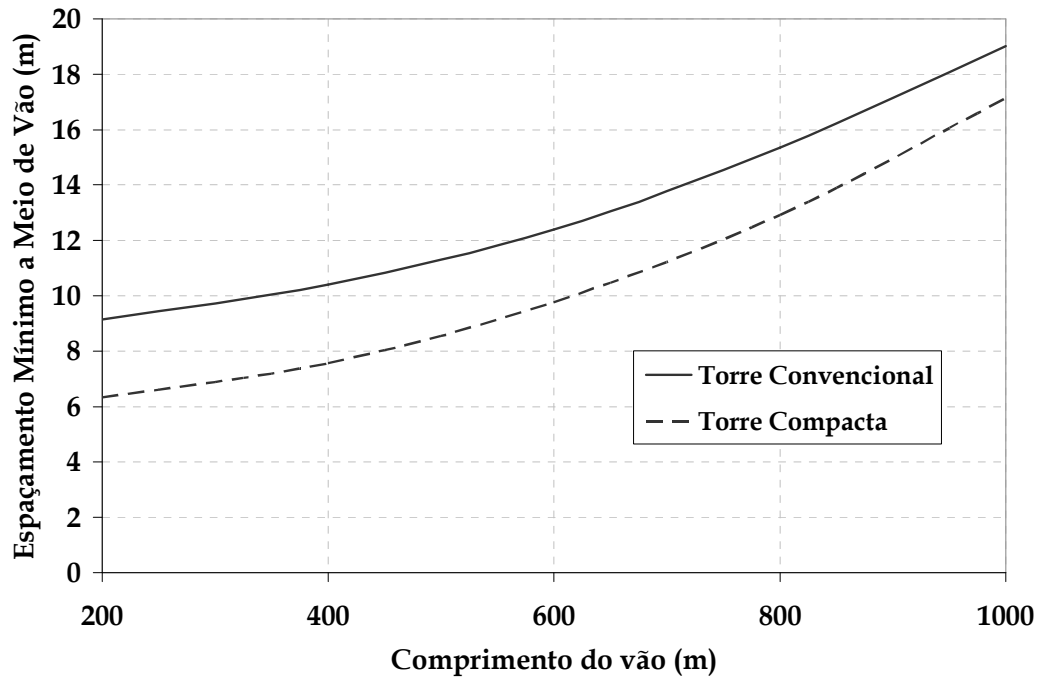


Figura 4.10: Espaço Mínimo a Meio de Vão entre os Cabos Fase mais Próximos e o Cabo Pára-Raios em Função do Comprimento de Vão

As informações de suportabilidade do espaçamento entre condutores, que são de interesse na análise em questão, foram obtidas através de ensaios em laboratórios. As curvas que indicam a tensão crítica disruptiva entre condutores para espaçamentos até 8 metros foram fornecidas por Udo em (UDO, 1965). São curvas essencialmente lineares, e presume-se que podem ser extrapoladas para espaçamentos superiores. A figura 4.11 ilustra a curva obtida para impulsos negativos e a partir da mesma obtém-se um campo médio crítico de 623 kV/m. Wagner e Hileman obtiveram em (WAGNER, 1963) um valor aproximado ao encontrado por Udo em (UDO, 1965), igual a 607 kV/m para espaçamentos menores.

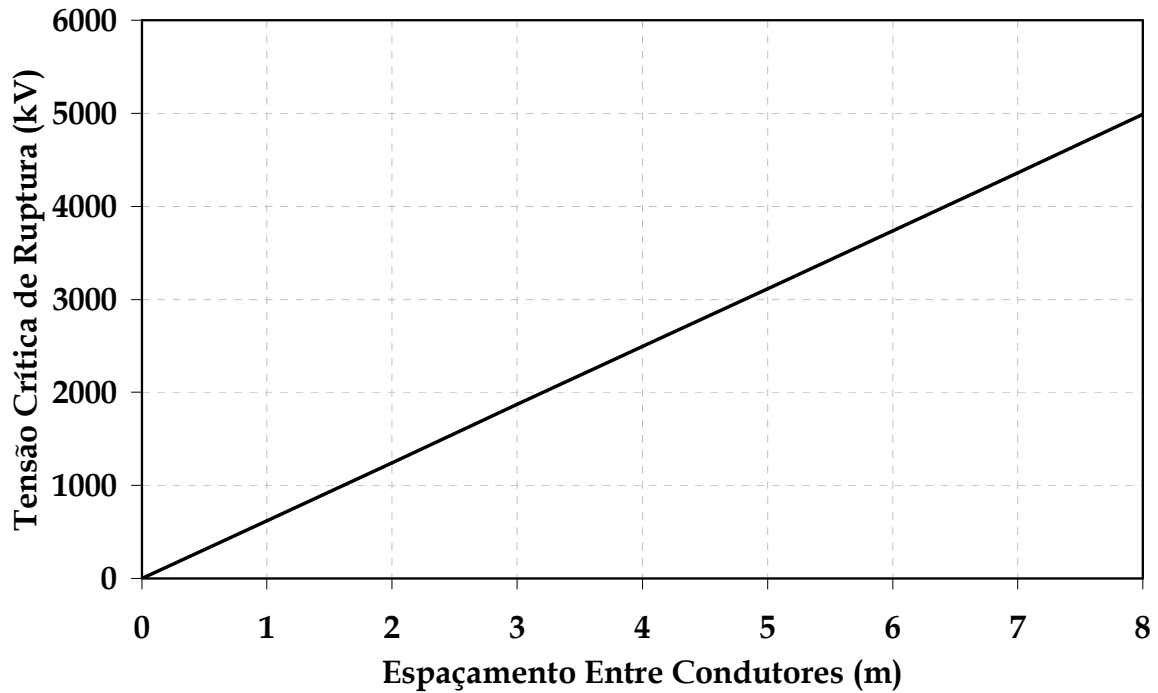


Figura 4.11: Curva de Suportabilidade Crítica entre Condutores para Impulsos Negativos (UDO, 1965)

Como já discutido no Capítulo 3 desta dissertação, a ruptura a meio de vão é um fenômeno considerado de certa complexidade devido às correntes de pré-descarga. Por razões já discutidas, nas simulações mostradas nesta dissertação, como uma primeira aproximação, são desprezados os efeitos da pré-descarga e a suportabilidade do espaçamento entre o cabo pára-raios e o cabo fase mais próximo no meio do vão,  $U_C$ , é dada pela equação 4.7:

$$U_C = E \times D_{ISOL} \tag{Eq. 4.7}$$

Onde :

$E$  é o campo médio crítico, igual a 623 kV/m (UDO, 1965);

Através da equação 4.7 e dos espaçamentos indicados na figura 4.10, pode-se estabelecer a suportabilidade crítica a meio de vão para a torre convencional e a torre compacta em função do comprimento do vão. Os resultados são mostrados na figura 4.12. Nas simulações, a suportabilidade ao longo do vão em análise é considerada constante e igual aos valores de suportabilidade calculados na região

central do vão.

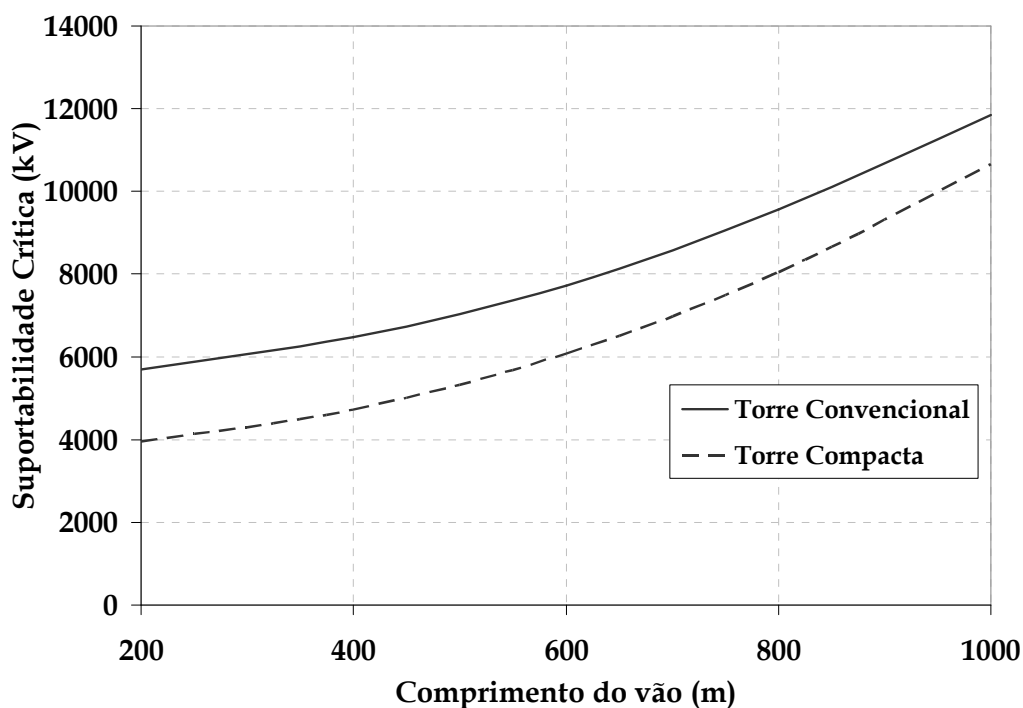


Figura 4.12: Valores de Suportabilidade Crítica entre o Cabo Pára-Raios e os Cabos Fase mais Próximos a Meio de Vão em Função do Comprimento do Vão

A torre compacta apresentou uma menor suportabilidade a meio de vão para os comprimentos de vãos considerados. No entanto, o fato desta torre ser mais susceptível a uma ruptura a meio de vão em caso de incidência de descarga dependerá ainda das sobretensões resultantes entre o cabo pára-raios atingido e o cabo fase mais próximo, da distância entre os cabos pára-raios bem como da ocorrência ou não de uma descarga simétrica e do número de descargas que atinge a linha.

Outro parâmetro que merece destaque é a suportabilidade crítica entre os cabos pára-raios,  $U_{PR}$ . Supondo que a descarga atinja um único cabo pára-raios, poderá haver uma ruptura entre este cabo e o cabo pára-raios adjacente. Nesse caso a possibilidade de ocorrência deste fenômeno antes que haja uma ruptura a meio de vão deve ser avaliada, pois tem impacto direto nas sobretensões resultantes na linha. A suportabilidade entre os cabos pára-raios pode ser dada pela equação 4.8:

$$U_{PR} = E \times d_{pr} \tag{Eq. 4.8}$$

Onde  $d_{pr}$  é a distância entre os pára-raios.

A tabela 4.8 indica a distância entre os cabos pára-raios e a respectiva suportabilidade  $U_{PR}$  para a torre convencional e a torre compacta. É importante destacar que a torre convencional apresenta um maior espaçamento e, conseqüentemente, uma maior suportabilidade entre tais cabos, dificultando, portanto, a ocorrência de descarga entre os cabos pára-raios antes da ocorrência de ruptura entre o cabo pára-raios atingido e o cabo fase mais próximo. Tal suportabilidade é constante com a variação do comprimento do vão, uma vez que o espaçamento horizontal se mantém fixo, desconsiderando-se que os cabos podem se deslocar devido aos ventos.

Tabela 4. 8 - Espaçamento entre os Cabos Pára-Raios e a Respectiva Suportabilidade Crítica para as Torre Convencional e Torre Compacta.

Tipo de Torre	Espaçamento entre os Cabos Pára-Raios (m)	Suportabilidade Crítica (kV)
Convencional	19	11837
Compacta	7,54	4697,42

Caso a suportabilidade mínima entre os cabos pára-raios e os cabos fase a meio de vão for maior que a suportabilidade entre os cabos pára-raios, para que haja uma ruptura a meio de vão, é provável que ocorra primeiramente uma disrupção entre os cabos pára-raios. É possível, através das figuras 4.13 e 4.14, que mostra as curvas de suportabilidade da torre convencional e da torre compacta respectivamente, estabelecer quais comprimentos de vão que estão mais susceptíveis a ocorrência de ruptura entre os cabos pára-raios para cada torre, sobrepondo a curva de suportabilidade entre o cabo pára-raios e os cabos fase mais próximos a meio de vão e a curva que representa a suportabilidade entre os cabos pára-raios.

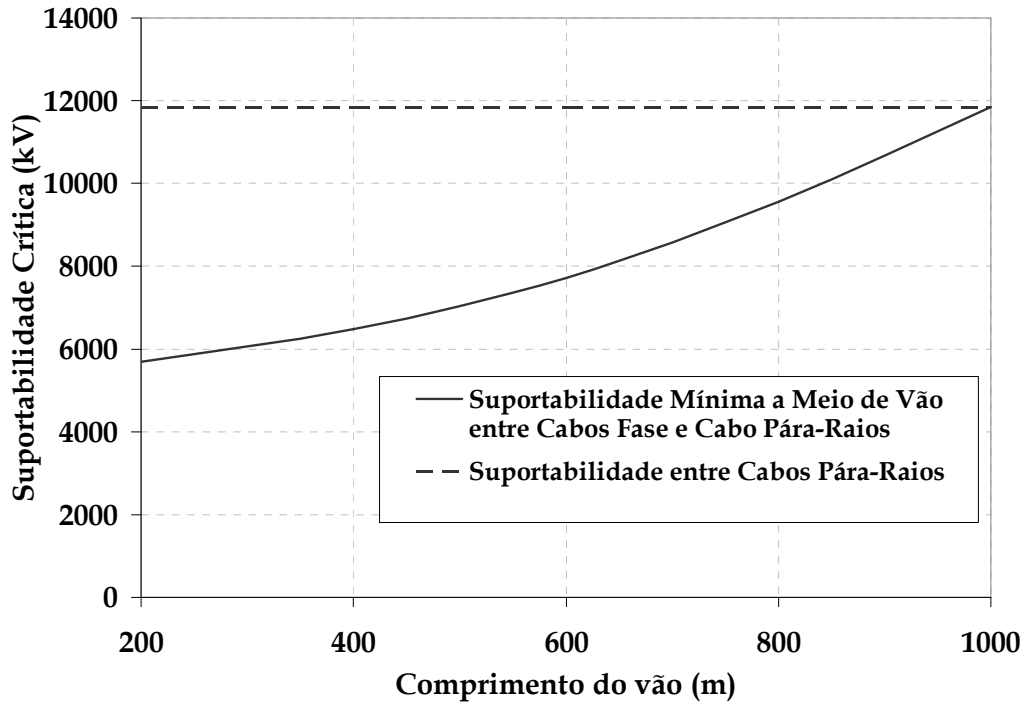


Figura 4.13: Comparação entre a Suportabilidade Crítica entre o Cabo Pára-Raios e os Cabos Fase a Meio de Vão e a Suportabilidade entre os Cabos Pára-Raios para a Torre Convencional

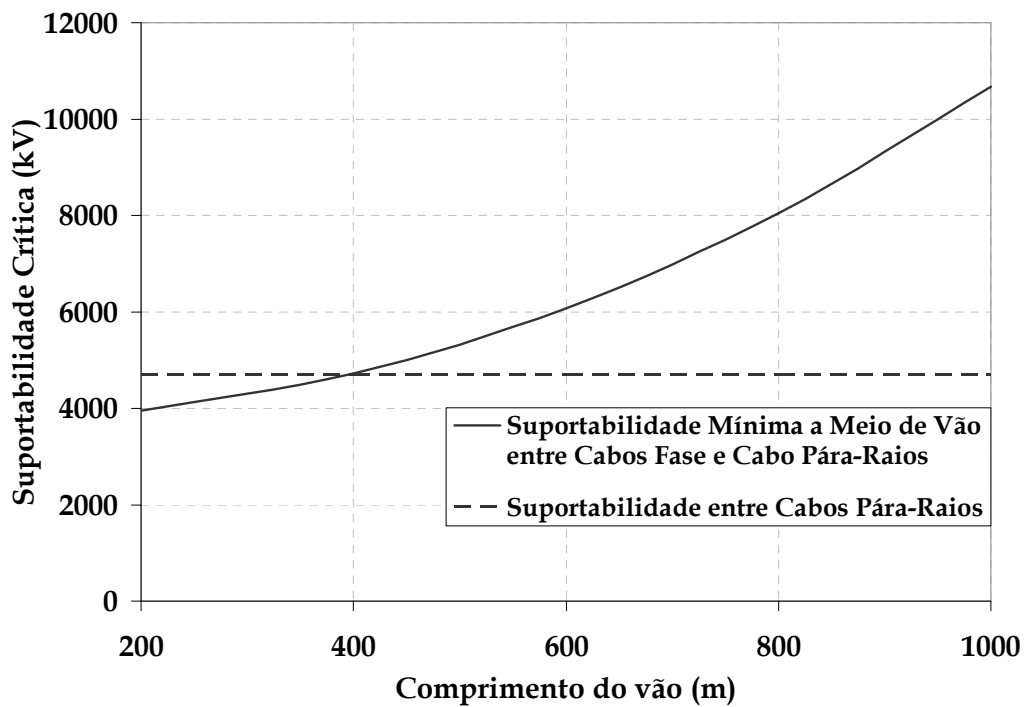


Figura 4.14: Comparação entre a Suportabilidade Crítica entre o Cabo Pára-Raios e os Cabos Fase a Meio de Vão e a Suportabilidade entre os Cabos Pára-Raios para a Torre Compacta

A partir da figura 4.13, é possível observar que, dentro da faixa de comprimentos de vão analisados, a curva de suportabilidade mínima entre o cabo pára-raios e os

cabos fase a meio de vão se encontra abaixo da suportabilidade entre os cabos pára-raios na torre convencional. Com isso, dentro dessa faixa, é pouco provável a ocorrência de ruptura entre os cabos pára-raios sem antes haver uma ruptura entre o cabo pára-raios e o cabo fase mais próximo. Já em relação à torre compacta, como pode ser observado pela figura 4.14, os vãos cujos comprimentos variam entre aproximadamente 400 m e 1000 m estão susceptíveis a sofrerem descargas entre os cabos pára-raios antes que possa ocorrer uma ruptura a meio de vão.

É importante destacar que as descargas simétricas, fenômeno no qual a descarga incide quase simultaneamente em ambos os cabos pára-raios, poderá ocorrer, gerando sobretensões no ponto de incidência similares à situação em que ocorre a ruptura entre os cabos pára-raios. Apesar de sua probabilidade de ocorrência aumentar com a aproximação entre os cabos pára-raios, a ocorrência de tal fenômeno é mais imprevisível.

#### ***4.4 Metodologia Simplificada de Cálculo da Taxa de Ruptura a Meio de Vão***

##### ***4.4.1 Introdução***

Na metodologia sugerida neste tópico assume-se que todas as primeiras descargas incidentes ao longo do vão atingem os cabos pára-raios, desconsiderando-se assim as descargas que poderiam atingir os cabos fase. Considera-se que a linha também atravessa um terreno plano.

Após a maioria das incidências de primeiras descargas, ocorrem uma ou mais descargas subseqüentes. Em geral a primeira descarga é sucedida por duas ou mais descargas de retorno subseqüentes, que nem sempre incidem sobre o mesmo ponto atingido pela primeira descarga. Em geral, 1/3 a 1/2 das descargas subseqüentes atingem pontos diferentes (TORRES, 2001), (RAKOV, 2001). Diante disso, na metodologia aqui apresentada é considerado que cada primeira descarga que incide sobre o vão apresenta uma descarga subseqüente que atinge o mesmo ponto que a primeira descarga, podendo

---



ser, portanto relevante para o desempenho da linha.

No item 4.4.4 deste tópico, a metodologia de cálculo da taxa de ruptura a meio de vão para primeiras descargas é detalhada. No item 4.4.5 é incluída a contribuição das descargas subseqüentes. A taxa de ruptura a meio de vão total da linha por 100 km por ano é dada pela soma das contribuições das primeiras descargas e das descargas subseqüentes.

#### 4.4.2 A Divisão do Vão em Trechos

Como as linhas de UAT e EAT apresentam vãos muito extensos, não se deve analisar apenas um único ponto ou uma pequena região central do vão para fins de verificação de ocorrência de ruptura a meio de vão. É possível que haja uma extensa faixa do vão possa trazer alguma contribuição à taxa de ruptura. Portanto, é necessário analisar todo o trecho do vão onde ocorrem incidência de descargas.

Para fins de simplificação, dividiu-se o vão em dez trechos, cada um com 10% do comprimento do mesmo. Considera-se que as descargas incidentes no vão ocorrem entre 10% e 90% de seu comprimento, sendo que para os outros dois trechos de 10% do comprimento do vão adjacentes às torres assume-se que as incidências que ali ocorrem são incidências nas torres. A figura 4.15 representa tais regiões ao longo do vão.

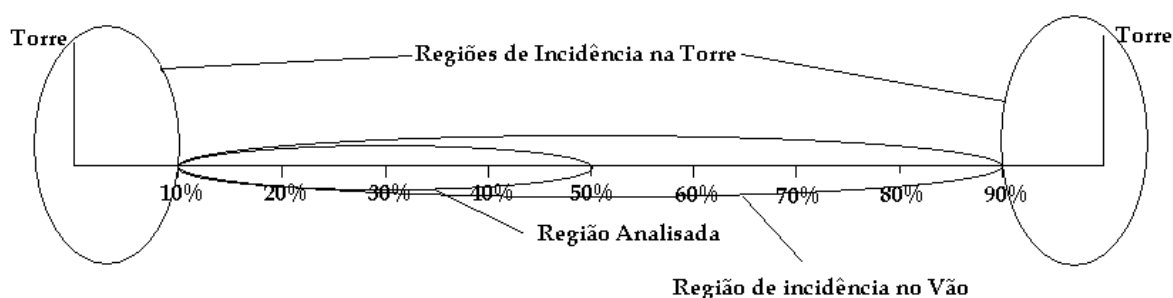


Figura 4.15 - Regiões do Vão em Análise

Como o vão é simétrico, apenas os quatro trechos entre 10% e 50% do comprimento do vão foram analisados, considerando-se que as descargas que atingem o vão são distribuídas

uniformemente entre estes quatro trechos (figura 4.16).

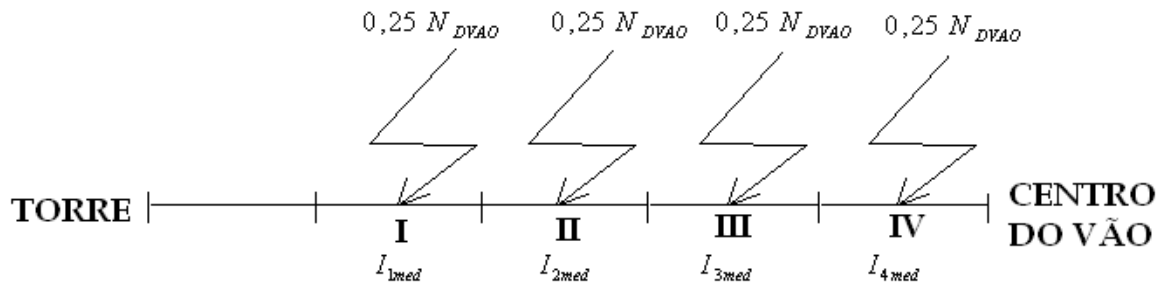


Figura 4.16 - Esquema Considerado no Cálculo da Taxa de Ruptura a Meio de Vão

### 4.4.3 Cálculo da Corrente Crítica Média por Trecho e a Respectiva Probabilidade Acumulada

A partir das sobretensões máximas obtidas através de cada injeção das ondas de corrente de descargas primeiras e subseqüentes ao longo do vão,  $V_{MAX}$ , em kV/kA e dos valores de suportabilidade mínima a meio de vão entre o cabo pára-raios e os cabos fase,  $U_c$ , em kV, calcula-se o valor de amplitude mínimo de corrente capaz de causar uma ruptura a meio de vão. Tal corrente crítica  $I_c$  é calculada através da Equação 4.9:

$$I_c = \frac{U_c}{V_{MAX}} \tag{Eq. 4.9}$$

Dados os valores de corrente crítica obtidos ao longo do vão, é possível calcular um valor médio de corrente crítica  $I_{Kmed}$  para cada trecho  $k$  em questão, a partir da equação 4.10, para primeiras descargas ou descargas subseqüentes, dependendo do cálculo que esteja sendo efetuado.

$$I_{Kmed} = \frac{I_{kini} + I_{kfin}}{2} \tag{Eq. 4.10}$$

Onde:

$I_{kini}$  é o valor da corrente crítica no ponto inicial do trecho k em análise;

$I_{kfin}$  é o valor da corrente crítica no ponto final do trecho k em análise.

Para cada valor de corrente crítica média calculado por trecho foi obtido o respectivo valor de probabilidade acumulada, que representa a probabilidade de uma dada corrente  $I$  ter amplitude maior ou igual à amplitude da corrente crítica  $I_{Kmed}$ . Tais probabilidades são obtidas através das equações 4.11 e 4.12 para primeiras descargas,  $P_{KPD}$ , e subseqüentes,  $P_{KDS}$ , respectivamente (IEEE, 1997b). Caso seja encontrado nos cálculos algum valor de amplitude de corrente crítica média dos limites estabelecidos, é atribuído um valor de probabilidade acumulada igual a zero.

$$P_{KPD}(I \geq I_{Kmed}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_{Kmed}}{31}\right)^{2,6}} \quad \text{para } I_{kmed} \leq 200kA \quad \text{Eq. 4.11}$$

$$P_{KDS}(I \geq I_{Kmed}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_{Kmed}}{12}\right)^{2,7}} \quad \text{para } I_{kmed} \leq 30kA \quad \text{Eq. 4.12}$$

#### 4.4.4 Cálculo da Taxa de Ruptura a Meio de Vão Originada por Primeiras Descargas

Inicialmente, é necessário calcular o número de primeiras descargas de retorno que incidem ao longo da linha,  $N_{PD}$ . A Equação 4.13 permite que se estime esse número de descargas por 100 km por ano, em função da altura média dos cabos pára-raios  $H_{MEDPR}$ , da distância  $b$  entre os cabos pára-raios e da densidade de *flashes*,  $N_d$ , por km<sup>2</sup> (EPRI, 1982):

$$N_{PD} = 0,1 \times N_d \times (b + 4 \times H_{MEDPR}^{1,09}) \quad \text{Eq. 4.13}$$

A altura média dos cabos pára-raios pode se calculada pela equação 4.14:

$$H_{MEDPR} = h_{pr} - \left( \frac{2}{3} \times f_{cpr} \right) \quad \text{Eq. 4.14}$$

Onde:

$h_{pr}$  é a altura dos cabos pára-raios na torre;

$f_{cpr}$  é a flecha dos cabos pára-raios

Neste trabalho, admite-se que, em média, 60% das primeiras descargas de retorno que incidem em uma linha atingem-na ao longo do vão e que 40% das incidências ocorrem na torre ou próxima à mesma. A densidade de flashes por km<sup>2</sup>,  $N_d$ , foi considerada igual a 1, o que permite que se calcule a taxa de ruptura a meio de vão para qualquer densidade de flashes desejada bastando multiplicar este valor pela taxa encontrada nos cálculos desta dissertação. Com isso, o número de primeiras descargas que atingem o vão é dado pela equação 4.15:

$$N_{DVAO} = 0,6 \times N_{PD} \quad \text{Eq. 4.15}$$

Cada trecho em análise é incidido por 25% das descargas que atingem o vão, uma vez que as descargas são distribuídas por quatro trechos em análise. A partir disso, a taxa de ruptura por trecho  $k$  por 100 km por ano,  $T_{kPD}$ , é dada pela Equação 4.16, que é composta ainda pela probabilidade acumulada da corrente crítica média calculada para o trecho  $k$  em análise:

$$T_{kPD} = 0,25 \times N_{DVAO} \times P_{KPD} \quad \text{Eq. 4.16}$$

E a taxa total de ruptura a meio de vão por 100 km por ano devido às primeiras descargas pode ser calculada pela equação 4.17:

$$T_{PDRMV} = \sum_{k=1}^4 T_{kPD} \quad \text{Eq. 4.17}$$

#### 4.4.5 Cálculo da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para Descargas Subseqüentes

Uma vez calculada a taxa de ruptura a meio de vão devido às primeiras descargas de retorno, deve-se realizar o cálculo da taxa relativa às descargas subseqüentes, de modo a verificar a sua contribuição ao desempenho da linha.

Considerando que cada primeira descarga de retorno apresenta em média uma descarga subseqüente que incide sobre o mesmo ponto de impacto, a fim de se calcular o número de descargas subseqüentes que podem causar uma ruptura meio de vão, deve-se subtrair a taxa de ruptura a meio de vão calculada para o trecho, obtidas através do cálculo apresentado no item 4.4.4 deste tópico, do número de primeiras descargas que atingem cada trecho  $k$  do vão. As descargas subseqüentes de incidências de descargas primeiras que causariam uma ruptura a meio de vão incidem sobre o vão quando já houve a ruptura do isolamento. O número de descargas subseqüentes por 100 km por ano em cada trecho  $k$  que podem causar ruptura a meio de vão é então calculado pela Equação 4.18. As descargas subseqüentes àquelas primeiras descargas que ocasionaram uma ruptura a meio de vão a cada trecho  $k$  são desconsideradas pela subtração do termo  $T_{kPD}$  do número total de descargas subseqüentes que atingem a linha. Tal subtração é necessária pelo fato de que já ocorreu a ruptura a meio de vão devido à primeira descarga correspondente.

$$N_{KDS} = 0,25 \times N_{DVAO} - T_{kPD} \quad \text{Eq. 4.18}$$

A taxa de ruptura a meio de vão é dada, para cada trecho, através da equação 4.19:

$$T_{kDS} = N_{KDS} \times P_{KDS} \quad \text{Eq. 4.19}$$

A taxa total de ruptura a meio de vão devido a descargas subseqüentes é dada pela equação 4.20

$$T_{DSRMV} = \sum_{k=1}^4 T_{kDS} \quad \text{Eq. 4.20}$$

Finalmente, tem-se a taxa total de ruptura a meio de vão da linha, por 100 km por ano, dada pela equação 4.21:

$$T_{TOT} = T_{PDRMV} + T_{DSRMV} \quad \text{Eq. 4.21}$$

## ***4.5 Procedimentos e Resultados das Simulações***

### ***4.5.1 Introdução***

Neste item são expostos e discutidos os resultados de simulação e cálculo obtidos neste trabalho. Primeiramente são analisadas algumas formas de onda de sobretensões originadas a partir da injeção de corrente de descarga no cabo ou em ambos os cabos pára-raios. Posteriormente, são apresentados os valores de sobretensão máxima no ponto de incidência e a respectiva corrente crítica ao longo de cada comprimento de vão em análise. Resultados levando-se em conta o efeito corona no cabo ou nos cabos pára-raios atingidos e o feixe de sub-condutores da fase mais próxima também fazem parte dessa discussão.

Primeiramente, sem se considerar o efeito corona, as três ondas de corrente implementadas no ATPDraw (figuras 4.6 e 4.7) foram injetadas ao longo de comprimentos de vão entre 200 m e 1000 m, em pontos entre de 10% e 90% do comprimento do vão, a cada 10%, para cada configuração de torre. Para cada injeção de corrente, a sobretensão máxima resultante no ponto de incidência entre o cabo ou os cabos pára-raios e o feixe de sub-condutores da fase mais próxima, em kV/kA, foram registradas de modo a calcular a corrente crítica para aquele ponto. Foram efetuadas injeções de corrente considerando a descarga simétrica e assimétrica.

Posteriormente, a partir da injeção dos valores de corrente crítica, obteve-se as sobretensões máximas no cabo pára-raios ou nos cabos pára-raios, no caso de

descarga simétrica, e no feixe de sub-condutores da fase mais próxima naquele ponto e então se pôde calcular os raios efetivos a fim de se modelar o efeito corona ao longo de todo o vão no qual a corrente de descarga foi injetada. Com a modificação do raio externo do cabo pára-raios e do raio equivalente do feixe de sub-condutores da fase mais próxima, as simulações descritas no parágrafo anterior foram repetidas a fim de se determinar novos valores de corrente crítica, levando-se em conta o efeito corona.

Finalmente, com os valores de corrente crítica ao longo dos vãos em análise, é possível estimar a taxa de ruptura a meio de vão, através da metodologia descrita no item 4.4.

#### ***4.5.2 Formas de Onda das Sobreensões Resultantes***

As figuras 4.17, 4.18 e 4.19 mostram algumas sobreensões resultantes de injeções de corrente de primeira descarga (pico duplo e pico único) assimétricas (apenas em um cabo pára-raios) de corrente de primeira descarga e subsequente no centro do vão, para comprimentos de vão iguais a 200 m, 600 m e 1000 m respectivamente, no ponto de incidência, entre o cabo pára-raios e o feixe de sub-condutores mais próximo. As formas de onda de corrente de descargas injetadas para obtenção dessas sobreensões são aquelas indicadas na figura 4.6 (primeiras descargas) e figura 4.7 (descargas subsequentes). Como a amplitude das ondas de corrente injetadas foram ajustadas a fim de se obter um valor igual a 1 kA, pode-se dizer que as sobreensões resultantes são dadas em kV/ kA.

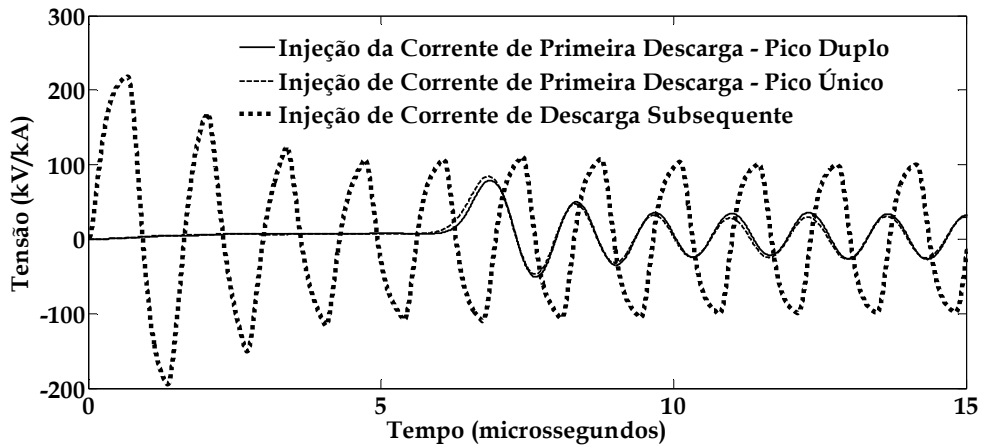


Figura 4.17 – Sobretensões Resultantes de Injeções de Corrente de Descarga Assimétrica no Centro do Vão de 200 m, sem considerar o efeito corona – Torre Compacta

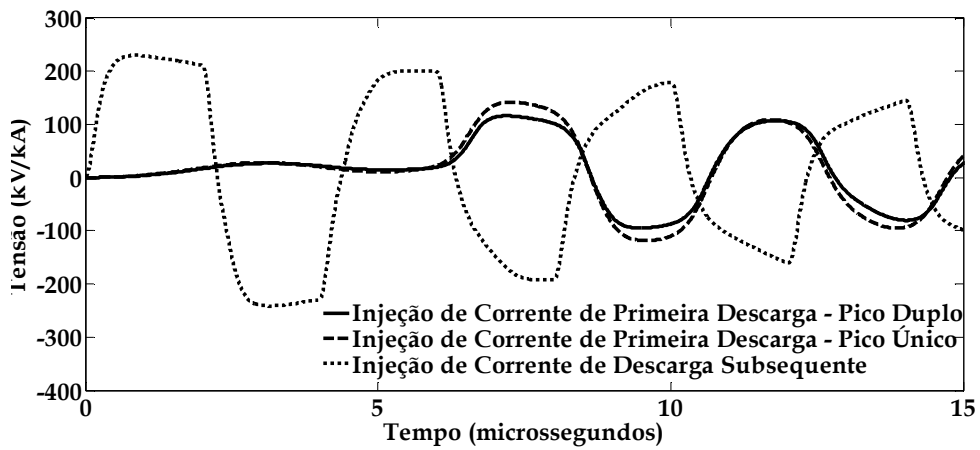


Figura 4.18 – Sobretensões Resultantes de Injeções de Corrente de Descarga Assimétrica no Centro do Vão de 600 m, sem considerar o efeito corona – Torre Compacta

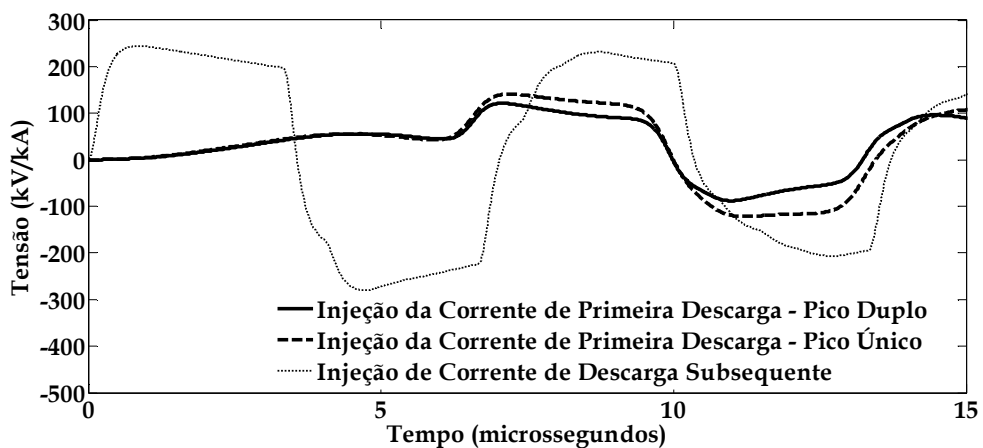


Figura 4.19 – Sobretensões Resultantes de Injeções de Corrente de Descarga Assimétrica no Centro do Vão de 1000 m, sem considerar o efeito corona – Torre Compacta



Observa-se em todas as figuras acima o caráter oscilatório das sobretensões resultantes, que é lentamente amortecido. Como discutido no Capítulo 3 desta dissertação, tal forma de onda é importante na avaliação da suportabilidade do espaçamento entre condutores ou entre um condutor e um feixe de sub-condutores, como é o caso das linhas de 500 kV utilizadas neste trabalho. Ao se utilizar ondas de impulso padrão e se desconsiderar as reflexões decorrentes de incidências a meio de vão, os resultados de suportabilidade crítica podem divergir muito do que se é verificado na prática. Outra importante observação é a variação da frequência da sobretensão resultante com o aumento do comprimento do vão. À medida que o vão aumenta tal frequência de oscilação diminui. Essa frequência também é importante na avaliação da suportabilidade do espaçamento a meio de vão.

A partir de tais figuras, observa-se que as maiores sobretensões por unidade de corrente foram obtidas ao se injetar a forma de onda de corrente subsequente, devido a curto tempo de frente que essa onda apresenta. No entanto, valores reduzidos de amplitude de descargas subsequentes geralmente são esperados, em relação aos valores de amplitude de primeiras descargas.

Em relação às primeiras descargas, a injeção de corrente de pico único resulta em sobretensões um pouco maiores em relação à injeção de corrente de pico duplo. Entretanto, dada as características típicas de corrente de descarga obtida em medições, a representação da onda de corrente com um único pico pode não ser muito precisa.

Ao se aplicar descargas simétricas (injeção de corrente nos dois cabos pára-raios), observa-se, além de uma considerável redução no valor máximo na amplitude da sobretensão resultante, que as oscilações são amortecidas rapidamente. As figuras 4.20, 4.21 e 4.22 exemplificam o fenômeno, para vão de 200 m, 600 m e 1000 m de comprimento e descargas primeiras de pico duplo e pico único e descargas subsequentes, respectivamente.

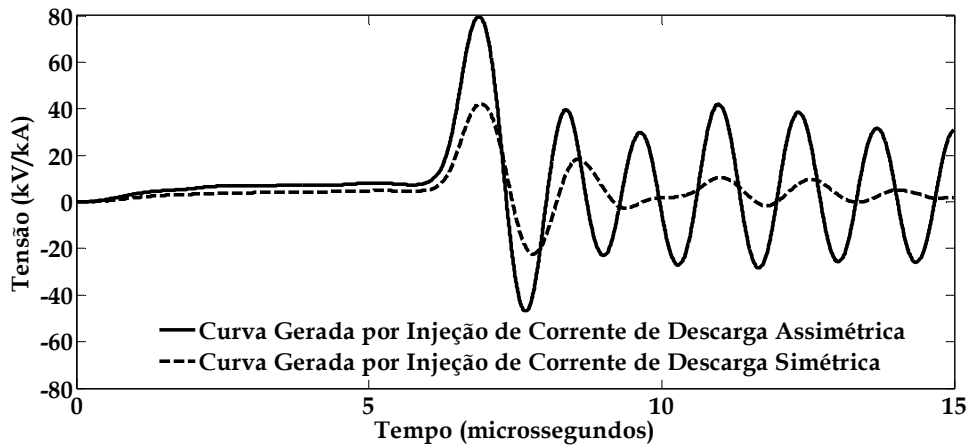


Figura 4.20: Comparação entre as Sobretensões Resultantes por Descarga Simétrica e Assimétrica devido a Injeção da Onda de Corrente de Descarga Primeira de Pico Duplo, no Centro do Vão de 200 m, sem considerar o efeito corona – Torre Compacta

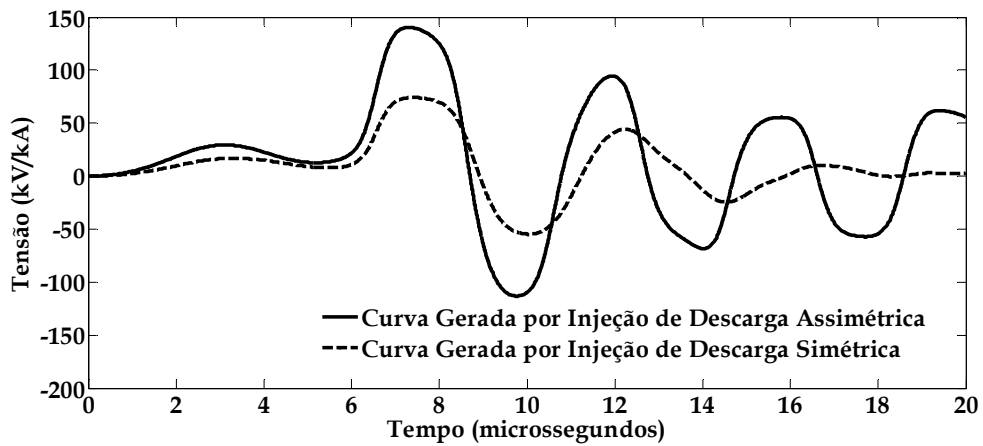


Figura 4.21: Comparação entre as Sobretensões Resultantes por Descarga Simétrica e Assimétrica devido a Injeção da Onda de Corrente de Descarga Primeira de Pico Único, no Centro do Vão de 600 m, sem considerar o efeito corona – Torre Compacta

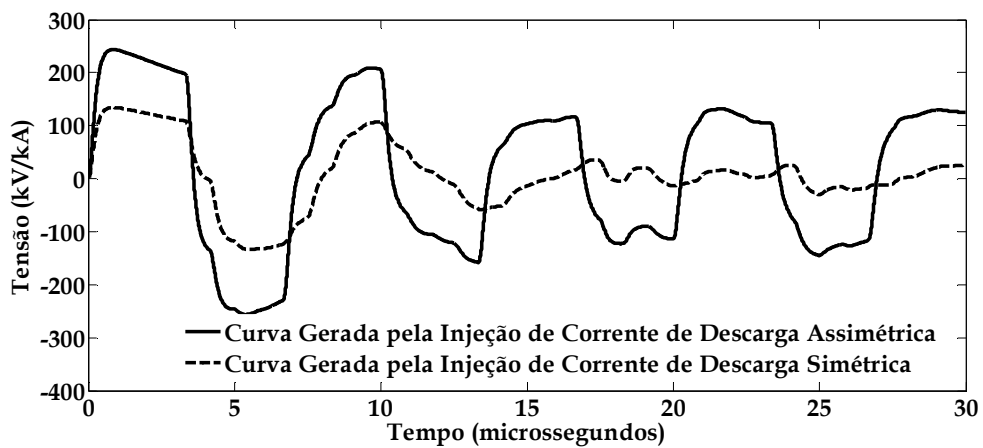


Figura 4.22: Comparação entre as Sobretensões Resultantes por Descarga Simétrica e Assimétrica devido a Injeção da Onda de Corrente de Descarga Subsequente, no Centro do Vão de 1000 m, sem considerar o efeito corona – Torre Compacta

As figuras 4.23, 4.24 e 4.25 abaixo permitem verificar a influência do cômputo do efeito corona nas simulações. Pode-se observar uma considerável atenuação nas sobretensões resultantes devido à redução da impedância de surto do cabo pára-raios atingido e ao aumento do acoplamento entre este e a fase mais próxima. Apesar da redução na velocidade de propagação ao se considerar o efeito corona, que a princípio poderá retardar consideravelmente o efeito das reflexões originadas nas torres adjacentes, este efeito não foi capaz de evitar que a sobretensão resultante fosse reduzida por outros fatores. No entanto, é importante destacar que o modelo de corona utilizado nesse trabalho tem algumas limitações, podendo ser bastante impreciso para representar o fenômeno real de propagação e, com isso, resultar em formas de onda pouco confiáveis.

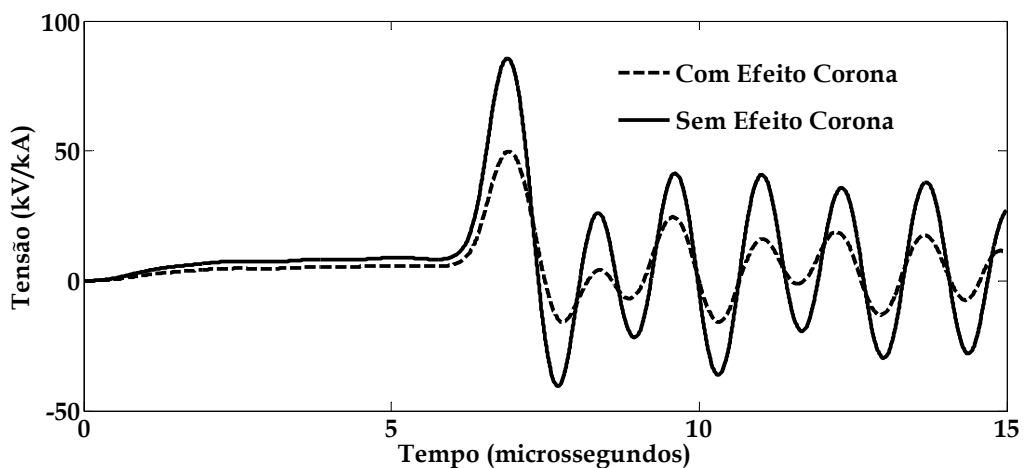


Figura 4.23: Comparação entre as Sobretensões Resultantes com e sem a Presença da Modelagem do Efeito Corona devido a Injeção da Onda de Corrente de Primeira Descarga Assimétrica de Pico Duplo, no Centro do Vão de 200 m – Torre Convencional

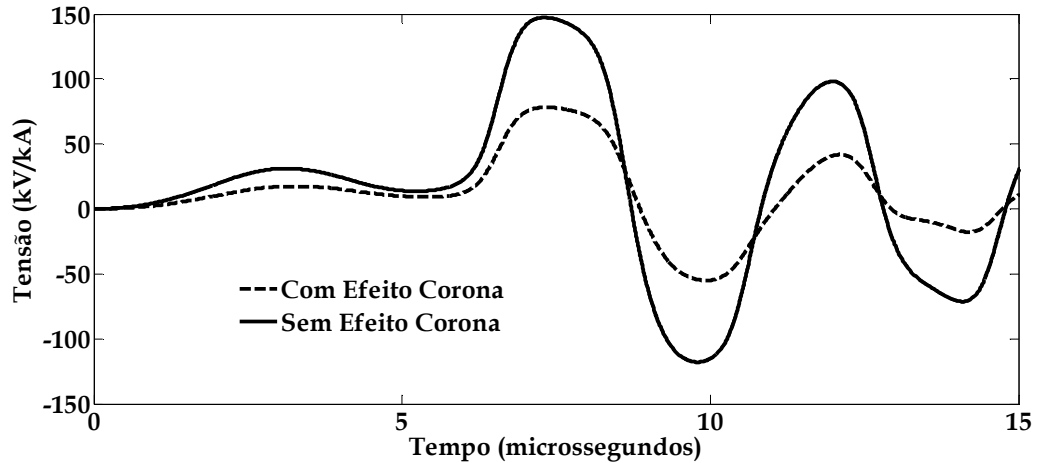


Figura 4.24: Comparação entre as Sobretensões Resultantes com e sem a Presença da Modelagem do Efeito Corona devido a Injeção da Onda de Corrente de Primeira Descarga Assimétrica de Pico Único, no Centro do Vão de 600 m – Torre Convencional

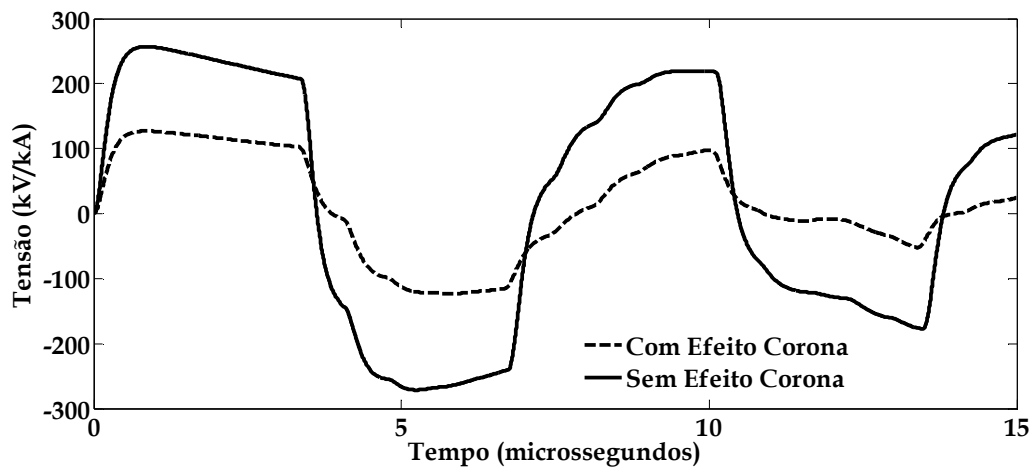


Figura 4.25: Comparação entre as Sobretensões Resultantes com e sem a Presença da Modelagem do Efeito Corona devido a Injeção da Onda de Corrente de Descarga Subseqüente, no Centro do Vão de 1000 m – Torre Convencional

### 4.5.3 Obtenção da Taxa de Ruptura a Meio de Vão sem a Consideração do Efeito Corona

Neste item são apresentados e discutidos os resultados das sobretensões resultantes de injeção das formas de onda de corrente, os respectivos valores de corrente crítica e o cálculo da taxa de ruptura a meio de vão sem se levar em consideração o efeito corona.

Utilizando a equação 4.17 e o critério de proporção de descargas incidentes ao longo do vão (60%) e na torre (40%), calculou-se o número de descargas que incide em cada configuração de torre, para os vãos em análise, considerando-se uma

densidade de descargas igual a 1 por km<sup>2</sup> por ano. Os resultados são mostrados nas tabelas 4.9 e 4.10 para a torre convencional e compacta respectivamente.

Tabela 4.9 – Número de Descargas Incidentes para a Configuração de Torre Convencional

Comprimento do Vão (m)	Número de descargas por 100 km por ano		
	Total	Incidência na Torre	Incidência no Vão
200	20,8	8,32	12,48
400	17,9	7,16	10,74
600	18,28	7,312	10,968
800	23,43	9,372	14,058
1000	30,18	12,072	18,108

Tabela 4.10 – Número de Descargas Incidentes para a Configuração de Torre Compacta

Comprimento do Vão (m)	Número de descargas por 100 km por ano		
	Total	Incidência na Torre	Incidência no Vão
200	19,47	7,788	11,682
400	16,02	6,408	9,612
600	18,4	7,36	11,04
800	24,51	9,804	14,706
1000	32,58	13,032	19,548

Ao se calcular o número de incidências em função dos comprimentos dos vãos, é observado que, através da formulação utilizada, obtém-se um número maior de descargas para vãos cujo comprimento é igual a 200 m que em vãos de 400 m e 600 m. Tal fato se deve a flecha reduzida dos cabos pára-raios em vãos de 200 m em relação aos outros vãos, que lhe conferem uma altura média superior aos outros dois comprimentos de vão. A altura dos cabos pára-raios na torre para vãos de 400 m é a mesma que a altura considerada para vãos de 200 m. Como a flecha do cabo pára-raios é menor para vãos de 200 m, se obtém uma altura média superior para esse comprimento de vão. Quanto aos vãos de 600 m, ainda que a altura da torre para esse comprimento de vão seja superior, a flecha do cabo pára-raios neste vão em relação à flecha em vãos de 200 m ainda é capaz de garantir uma altura média inferior.

As três formas de onda implementadas no ATPDraw foram injetadas ao longo dos vãos estudados, a cada 10% do comprimento dos mesmos, para as configurações de torre convencional e compacta. Foram consideradas descargas assimétricas (corrente injetada em um único cabo pára-raios) e simétricas (corrente injetada em ambos os cabos pára-raios simultaneamente). Através do registro dos valores de sobretensão máxima no ponto de incidência entre o cabo pára-raios no qual a corrente foi injetada e a fase mais próxima, obtidos a cada injeção de corrente, pôde-se, através da equação 4.9, calcular os valores de corrente crítica ao longo do vão. Os resultados para injeção de descarga assimétrica são apresentados nas curvas de tensão e corrente crítica a seguir em função do ponto de injeção de corrente, para comprimentos de vão entre 200 m e 1000 m nas figuras 4.26, 4.27 e 4.28 (torre convencional) e 4.29, 4.30 e 4.31 (torre compacta).

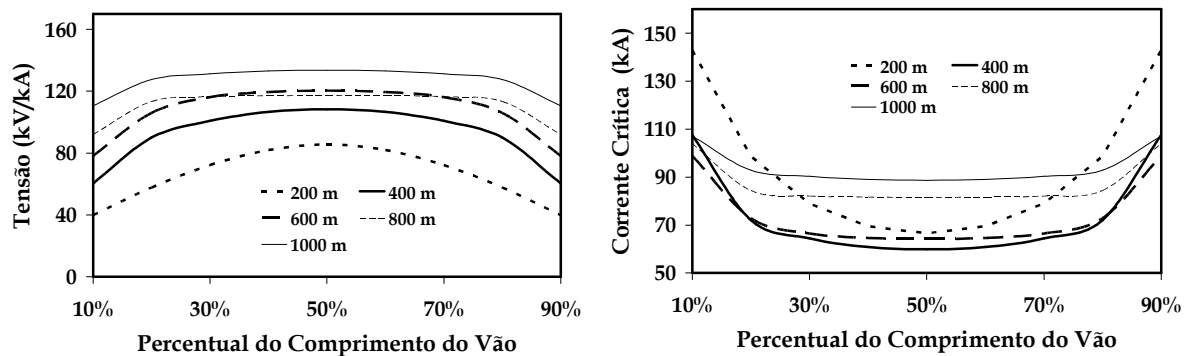


Figura 4.26 - Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Convencional, sem a Consideração do Efeito Corona (Primeiras Descargas Assimétricas - Pico Duplo)

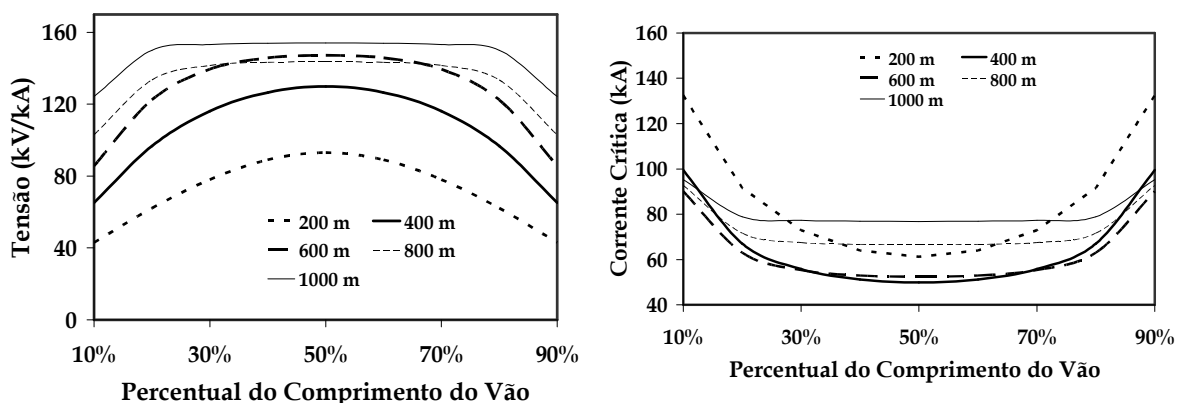


Figura 4.27 - Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Convencional, sem a Consideração do Efeito Corona (Primeiras Descargas Assimétricas - Pico Único)

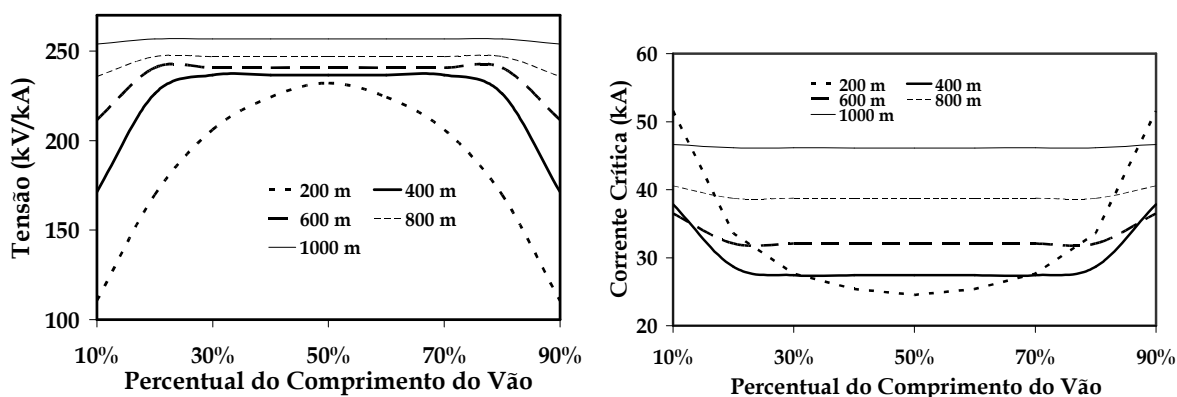


Figura 4.28 - Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Convencional, sem Consideração do Efeito Corona (Descargas Assimétricas Subseqüentes)

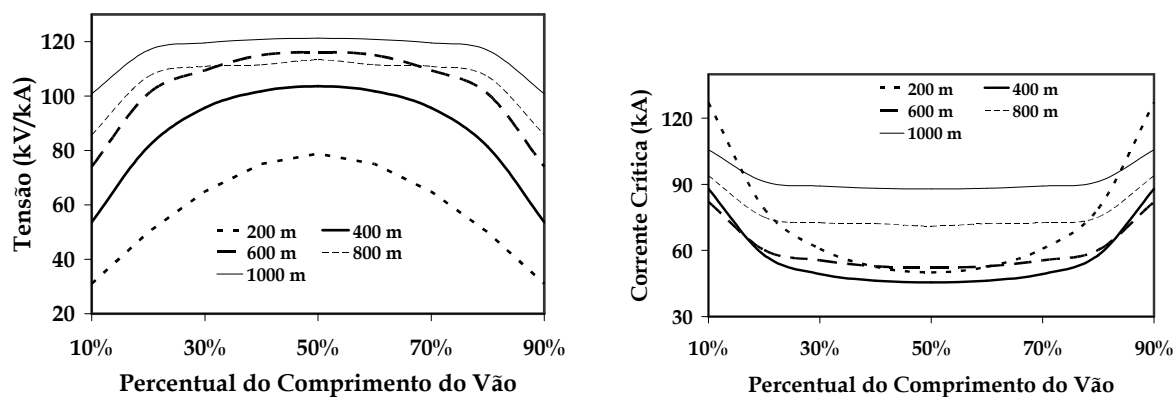


Figura 4.29 - Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Compacta, sem a Consideração do Efeito Corona (Primeiras Descargas Assimétricas - Pico Duplo)

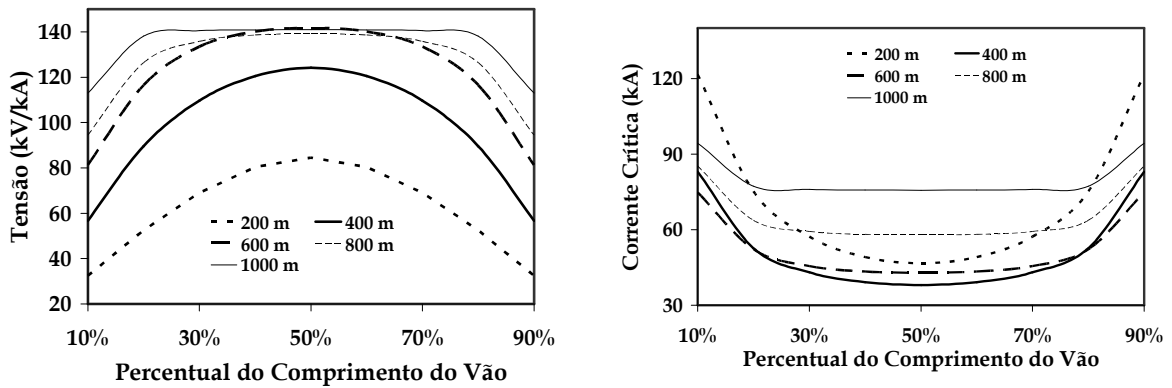


Figura 4.30 - Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Compacta, sem a Consideração do Efeito Corona (Primeiras Descargas Assimétricas - Pico Único )

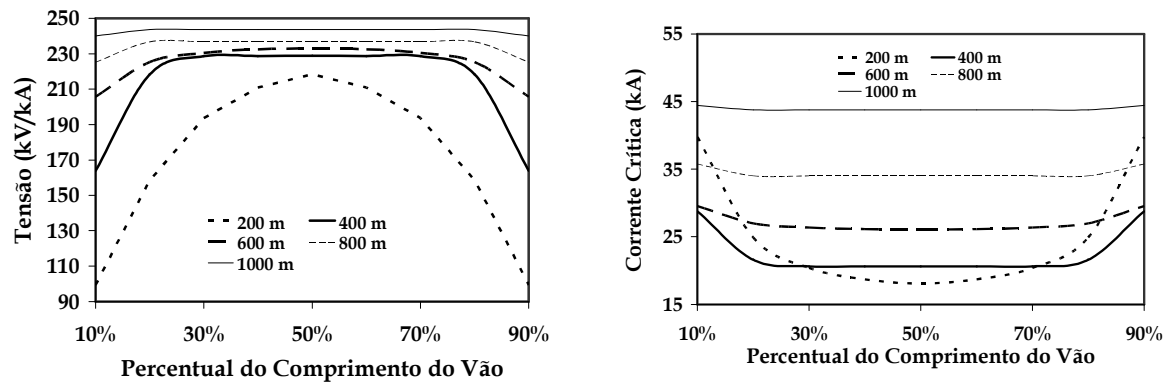


Figura 4.31 - Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Compacta, sem a Consideração do Efeito Corona (Descargas Assimétricas Subseqüentes)

Ao se injetar formas de onda de corrente que representam as primeiras descargas, as tensões máximas no ponto de incidência, entre o cabo pára-raios e a fase mais próxima, resultantes da injeção da corrente com pico único ao longo do vão, são mais elevadas que os valores obtidos através da injeção da corrente com pico duplo, resultando em valores de corrente crítica inferiores, como pode ser observado na figura 4.32 que ilustra as correntes críticas para incidências no ponto central do vão.



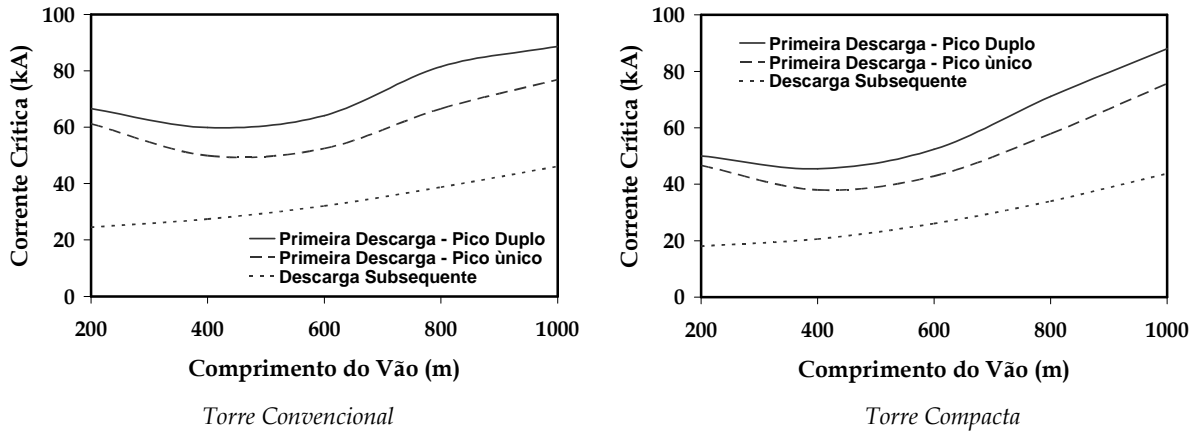


Figura 4.32 - Variação da Corrente Crítica em Função do Comprimento do Vão para Injeção de Corrente de Descarga no Ponto Central do Vão, sem o Efeito Corona e considerando a Incidência de Descargas Assimétricas

Através das curvas de sobretensão, que é composta pelas sobretensões máximas resultantes de cada injeção de corrente de primeira descarga ao longo do vão, é possível observar um aumento significativo nos valores máximos de sobretensão na região central da curva de cada comprimento de vão, à medida que se aumenta o comprimento do mesmo. No entanto, vãos de 600 m apresentam valores de sobretensão na região central do vão ligeiramente superiores aos encontrados para comprimentos de vão de 800 m. Os valores mais elevados de sobretensão para cada comprimento de vão sempre são encontrados na região central do mesmo. Vãos mais curtos apresentam significativa variação do valor de sobretensão ao longo de sua extensão. À medida que se aumenta o comprimento do vão, a região central do vão que apresenta pouca variação nos valores de sobretensão tende a crescer, o que demonstra a redução da influência das torres adjacentes.

Quanto à injeção da forma de onda de corrente que representa as descargas subseqüentes ao longo do vão, foram geradas as maiores sobretensões por unidade de corrente no mesmo, resultando em valores reduzidos de corrente crítica. Observa-se também um aumento dos valores de sobretensão ao longo do vão com o aumento do comprimento do mesmo. Por se tratar de uma onda com a frente muito rápida, as reflexões nas torres adjacentes têm pouco efeito, já que a onda de corrente consegue atingir rapidamente valores elevados. O trecho na região central dos vãos em análise onde a sobretensão é constante ou varia pouco em função do ponto de injeção de corrente são maiores que aquelas encontradas para primeiras descargas, principalmente para comprimentos de vão

---

acima de 400 m. No caso particular dos comprimentos de vão entre 800 a 1000 m, a o valor de sobretensão ao longo do vão, assim como o de corrente crítica, é praticamente constante ao longo do trecho em análise.

É importante destacar que o fato de vãos muito extensos atingirem elevados valores de sobretensão não implica em redução dos valores de corrente crítica. Com o aumento do comprimento dos vãos, as flechas dos condutores também aumentam. Contudo, para uma dada variação no comprimento de vão, a flecha dos cabos pára-raios aumenta menos que a flecha dos cabos fase, fazendo com que o espaçamento entre o cabo pára-raios e a fase mais próxima aumente. O aumento da sobretensão máxima no ponto de incidência nem sempre compensa o aumento da suportabilidade, o que faz com que a corrente crítica calculada naquele ponto cresça.

Os resultados obtidos para a injeção de descargas simétricas são mostrados na figura 4.33, 4.34 e 4.35 (torre convencional) e 4.36, 4.37 e 4.38 (torre compacta). As descargas simétricas reduzem consideravelmente os valores de sobretensão nos pontos de incidência, aumentando conseqüentemente o valor da corrente crítica naquele ponto, em relação às incidências de descargas assimétricas, o que pode ser ilustrado pela figura 4.39, para a torre convencional, e na figura 4.40 para a torre compacta. Tais resultados equivalem a situações em que ocorre ruptura entre os cabos pára-raios antes que ocorra uma ruptura entre o cabo pára-raios e a fase mais próxima, o que os tornam importantes principalmente para as linhas de torre compacta, na qual é prevista que essa situação ocorra para comprimentos de vão entre 400 m e 1000 m (figura 4.14). No entanto, o fenômeno de descarga simétrica pode ocorrer aleatoriamente em qualquer caso em que haja dois ou mais cabos pára-raios na linha, sendo importante a sua análise.

---

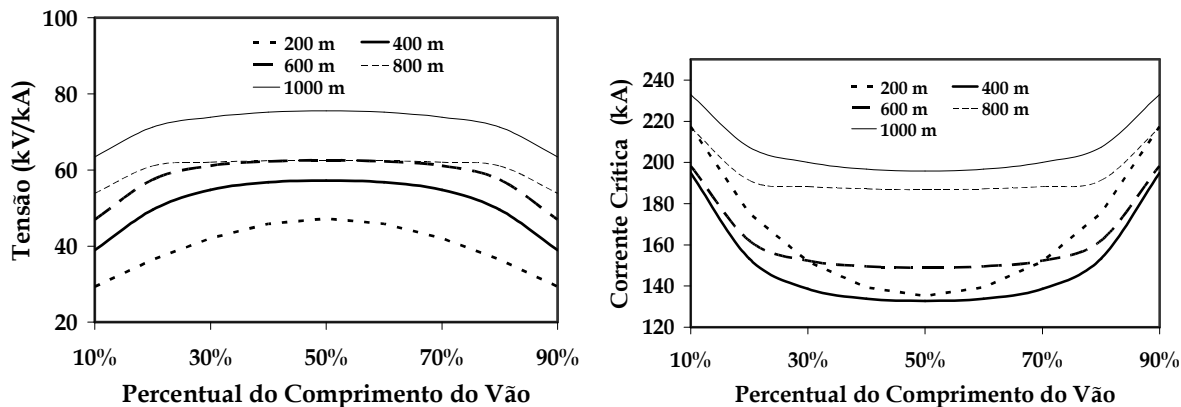


Figura 4.33 – Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Convencional, sem a Consideração do Efeito Corona (Primeiras Descargas Simétricas – Pico Duplo)

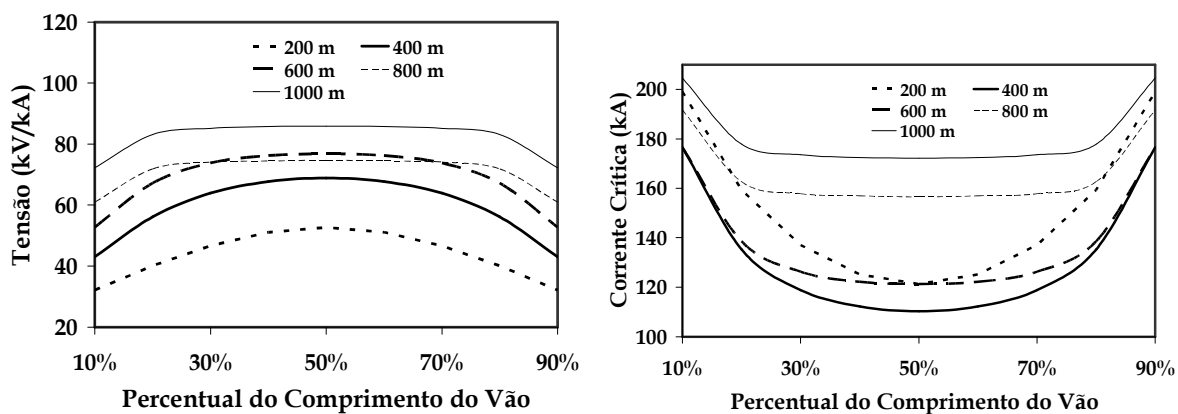


Figura 4.34 – Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Convencional, sem a Consideração do Efeito Corona (Primeiras Descargas Simétricas – Pico Único)

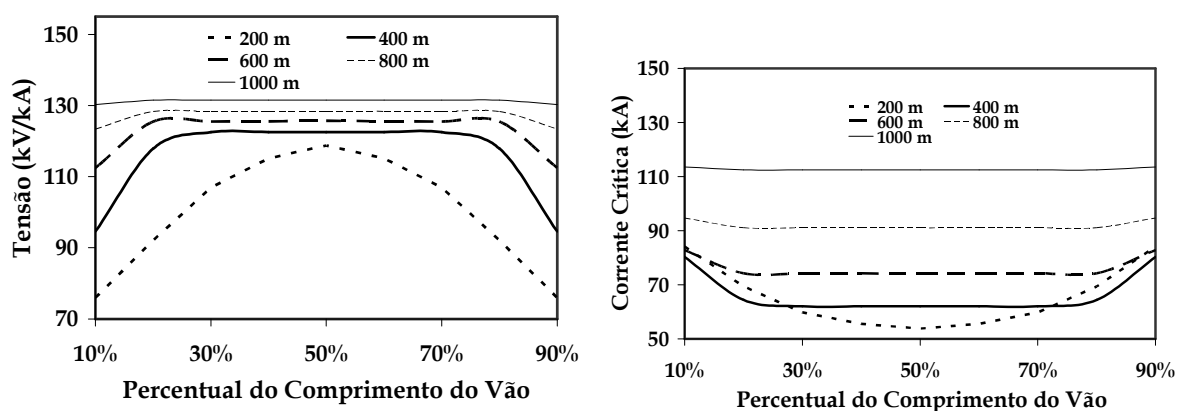


Figura 4.35 – Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Convencional, sem a Consideração do Efeito Corona (Descargas Simétricas Subseqüentes)

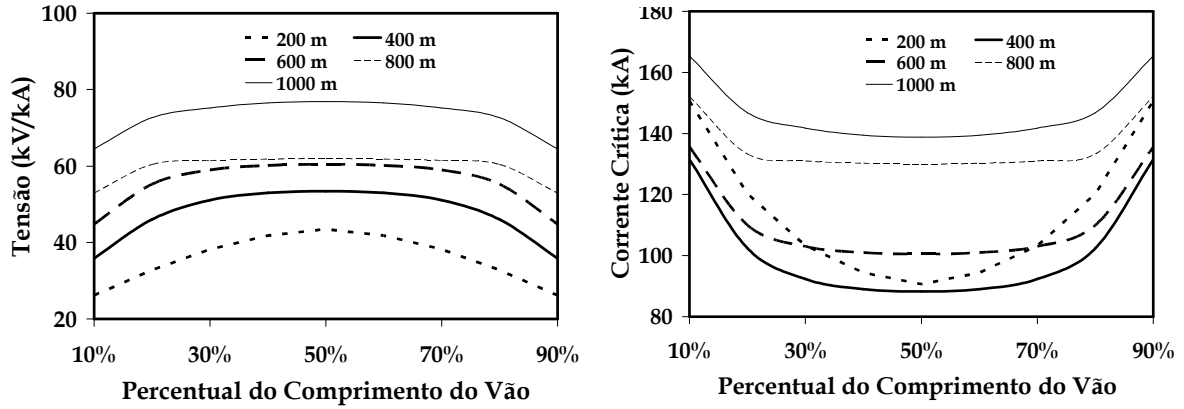


Figura 4.36 – Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Compacta, sem a Consideração do Efeito Corona (Primeiras Descargas Simétricas – Pico Duplo)

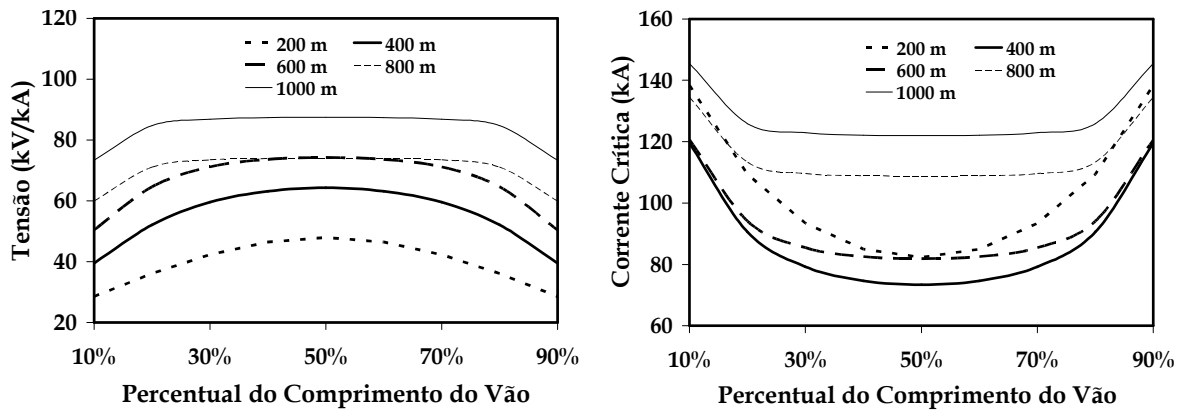


Figura 4.37 – Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Compacta, sem a Consideração do Efeito Corona (Primeiras Descargas Simétricas – Pico Único)

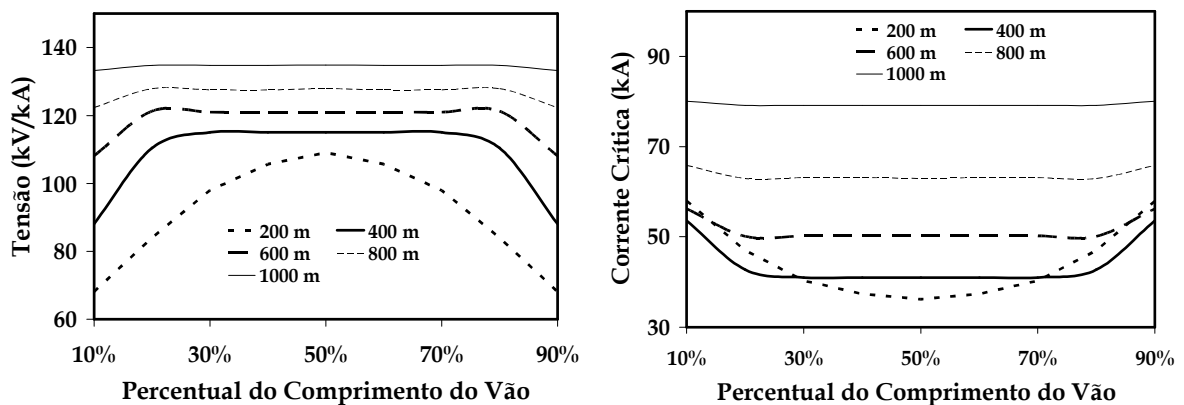


Figura 4.38 – Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Compacta, sem a Consideração do Efeito Corona (Descargas Simétricas Subseqüentes)

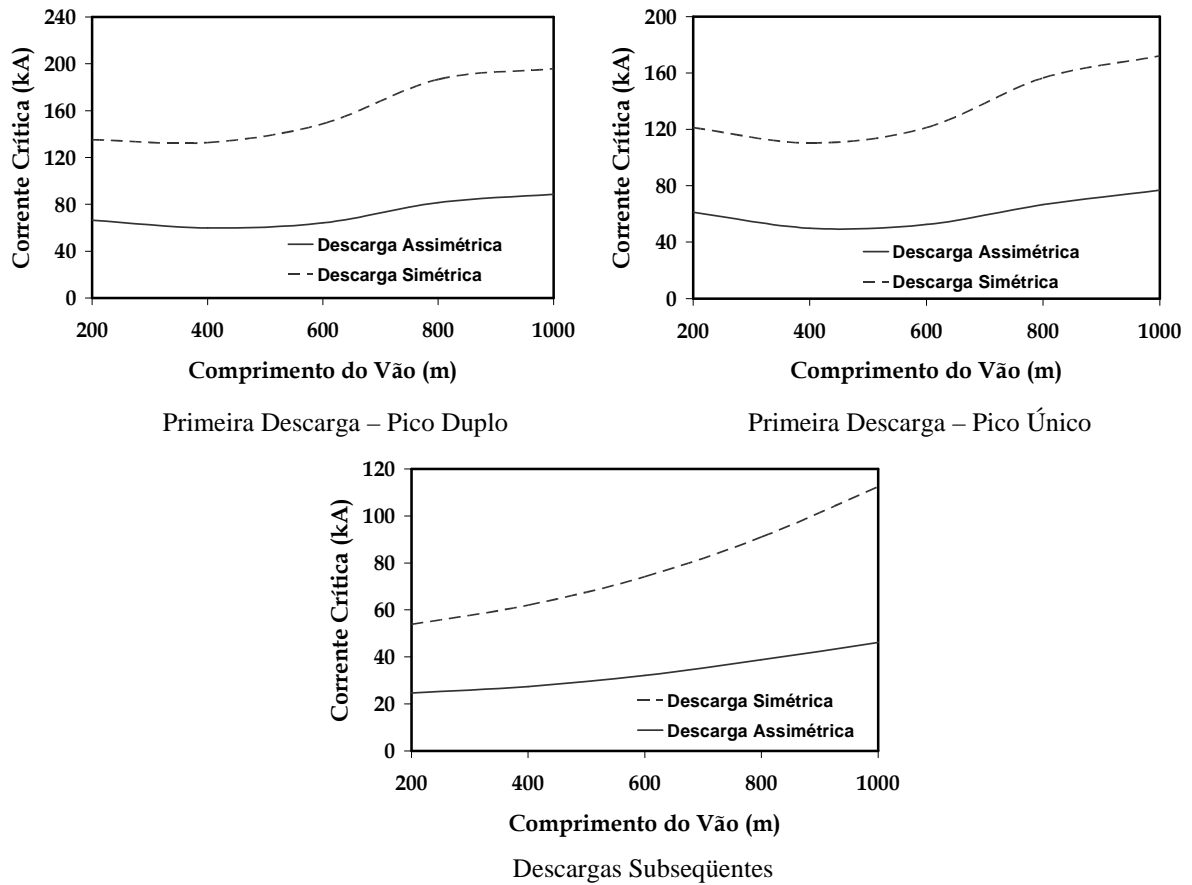


Figura 4.39 – Comparação entre Valores de Corrente Crítica Obtidos a Partir de Injeção de Descargas Assimétricas no Ponto Central dos Vãos em Análise, sem a Consideração do Efeito Corona para a Torre Convencional

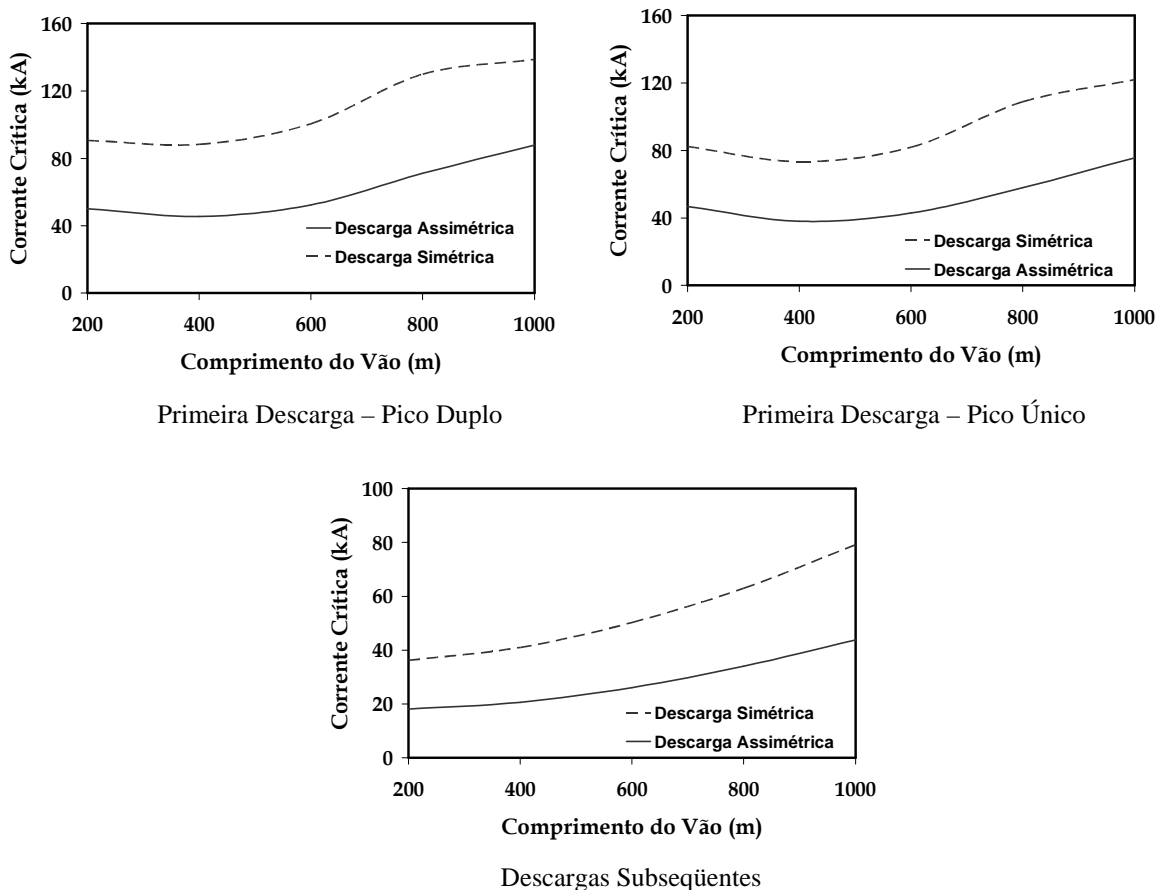


Figura 4.40 – Comparação entre Valores de Corrente Crítica Obtidos a Partir de Injeção de Descargas Assimétricas no Ponto Central dos Vãos em Análise, sem a Consideração do Efeito Corona, para a Torre Compacta

Os menores valores de corrente crítica foram encontrados, em todos os casos, na região central de vãos cujos comprimentos estão entre 200 m e 600 m. Essa faixa engloba os valores típicos de comprimento de vão que são utilizados em linhas de transmissão de 500 kV.

A partir dos valores de corrente crítica aqui apresentados e utilizando a metodologia apresentada no tópico 4.4 desta dissertação, foi calculada a taxa de ruptura a meio de vão para os comprimentos de vão em análise. Os resultados para incidências de descarga assimétrica são apresentados detalhadamente nas tabelas 4.11, 4.12 e 4.13 para a torre convencional e 4.14, 4.15 e 4.16 para a torre compacta. Já os resultados relativos a incidências de descargas simétricas são mostrados nas tabelas 4.17, 4.18 e 4.19 para a torre convencional e 4.20, 4.21 e 4.22 para a torre compacta.

Tabela 4.11 - Cálculo da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Convencional, considerando a Descarga Assimétrica, sem a Presença do Efeito Corona, com Representação da Primeira Descarga com Pico Duplo

Comprimento do Vão (m)	Trecho	Primeira Descarga			Descarga Subsequente			Taxa Total de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano
		Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	
200	I	120,71	2,83%	0,09	42,57	0,00%	0,00	0,09
	II	88,88	6,07%	0,19	30,62	0,00%	0,00	0,19
	III	74,23	9,36%	0,29	26,53	10,51%	0,30	0,59
	IV	68,05	11,46%	0,36	24,98	12,14%	0,34	0,69
400	I	89,82	5,92%	0,16	33,27	0,00%	0,00	0,16
	II	68,24	11,39%	0,31	28,04	9,18%	0,22	0,52
	III	62,61	13,85%	0,37	27,41	9,71%	0,22	0,60
	IV	60,36	15,03%	0,40	27,41	9,71%	0,22	0,62
600	I	85,86	6,61%	0,18	34,29	0,00%	0,00	0,18
	II	69,68	10,85%	0,30	32,09	0,00%	0,00	0,30
	III	65,56	12,48%	0,34	32,09	0,00%	0,00	0,34
	IV	64,40	13,00%	0,36	32,09	0,00%	0,00	0,36
800	I	94,16	5,27%	0,19	39,65	0,00%	0,00	0,19
	II	83,24	7,12%	0,25	38,74	0,00%	0,00	0,25
	III	81,90	7,41%	0,26	38,74	0,00%	0,00	0,26
	IV	81,62	7,47%	0,26	38,74	0,00%	0,00	0,26
1000	I	100,00	4,54%	0,21	46,40	0,00%	0,00	0,21
	II	91,59	5,64%	0,26	46,15	0,00%	0,00	0,26
	III	89,67	5,94%	0,27	46,15	0,00%	0,00	0,27
	IV	88,86	6,08%	0,28	46,15	0,00%	0,00	0,28

Tabela 4.12 – Cálculo da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Convencional, considerando a Descarga Assimétrica, sem a Presença do Efeito Corona, com Representação da Primeira Descarga com Pico Único

Comprimento do Vão (m)	Trecho	Primeira Descarga			Descarga Subsequente			Taxa Total de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano por Trecho
		Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	
200	I	112,06	3,42%	0,11	42,57	0,00%	0,00	0,11
	II	82,30	7,32%	0,23	30,62	0,00%	0,00	0,23
	III	68,47	11,30%	0,35	26,53	10,51%	0,29	0,64
	IV	62,62	13,85%	0,43	24,98	12,14%	0,33	0,76
400	I	83,28	7,11%	0,19	33,27	0,00%	0,00	0,19
	II	61,44	14,45%	0,39	28,04	9,18%	0,21	0,60
	III	53,55	19,45%	0,52	27,41	9,71%	0,21	0,73
	IV	50,59	21,87%	0,59	27,41	9,71%	0,20	0,79
600	I	76,60	8,69%	0,24	34,29	0,00%	0,00	0,24
	II	59,23	15,67%	0,43	32,09	0,00%	0,00	0,43
	III	54,18	18,97%	0,52	32,09	0,00%	0,00	0,52
	IV	52,71	20,10%	0,55	32,09	0,00%	0,00	0,55
800	I	82,21	7,34%	0,26	39,65	0,00%	0,00	0,26
	II	69,58	10,89%	0,38	38,74	0,00%	0,00	0,38
	III	67,13	11,83%	0,42	38,74	0,00%	0,00	0,42
	IV	66,65	12,02%	0,42	38,74	0,00%	0,00	0,42
1000	I	87,12	6,38%	0,29	46,40	0,00%	0,00	0,29
	II	78,12	8,29%	0,38	46,15	0,00%	0,00	0,38
	III	77,14	8,55%	0,39	46,15	0,00%	0,00	0,39
	IV	76,92	8,61%	0,39	46,15	0,00%	0,00	0,39

Tabela 4.13 – Resultado Total da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Convencional, considerando a Descarga Assimétrica, sem a Presença do Efeito Corona, por 100 km por Ano

Comprimento do Vão (m)	Primeiras Descargas (Pico Duplo) e Descargas Subsequentes	Primeiras Descargas (Pico Único) e Descargas Subsequentes
200	1,56	1,74
400	1,90	2,31
600	1,18	1,74
800	0,96	1,48
1000	1,01	1,44



Tabela 4.14 – Cálculo da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Compacta, considerando a Descarga Assimétrica, sem a Presença do Efeito Corona, com Representação da Primeira Descarga com Pico Duplo

Comprimento do Vão (m)	Trecho	Primeira Descarga			Descarga Subsequente			Taxa Total de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano
		Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	
200	I	103,10	4,21%	0,12	32,32	0,00%	0,00	0,12
	II	69,93	10,76%	0,31	22,63	15,27%	0,40	0,71
	III	56,69	17,23%	0,50	19,54	21,13%	0,51	1,01
	IV	51,32	21,23%	0,62	18,39	24,00%	0,55	1,17
400	I	72,97	9,75%	0,23	25,19	11,90%	0,26	0,49
	II	53,62	19,39%	0,47	21,11	17,86%	0,35	0,81
	III	47,81	24,48%	0,59	20,63	18,81%	0,34	0,93
	IV	45,92	26,48%	0,64	20,61	18,84%	0,33	0,97
600	I	71,18	10,33%	0,29	28,27	9,00%	0,22	0,51
	II	57,88	16,47%	0,45	26,68	10,37%	0,24	0,69
	III	54,18	18,97%	0,52	26,26	10,77%	0,24	0,76
	IV	52,60	20,19%	0,56	26,12	10,91%	0,24	0,80
800	I	84,53	6,86%	0,25	34,88	0,00%	0,00	0,25
	II	73,87	9,47%	0,35	34,02	0,00%	0,00	0,35
	III	72,40	9,93%	0,36	34,02	0,00%	0,00	0,36
	IV	71,64	10,17%	0,37	34,01	0,00%	0,00	0,37
1000	I	98,51	4,72%	0,23	44,11	0,00%	0,00	0,23
	II	90,25	5,85%	0,29	43,78	0,00%	0,00	0,29
	III	88,75	6,10%	0,30	43,78	0,00%	0,00	0,30
	IV	88,11	6,20%	0,30	43,77	0,00%	0,00	0,30

Tabela 4.15 – Cálculo da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Compacta, considerando a Descarga Assimétrica, sem a Presença do Efeito Corona, com Representação da Primeira Descarga com Pico Único

Comprimento do Vão (m)	Trecho	Primeira Descarga			Descarga Subsequente			Taxa Total de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano por Trecho
		Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	
200	I	98,41	4,73%	0,14	32,32	0,00%	0,00	0,14
	II	66,17	12,22%	0,36	22,63	15,27%	0,39	0,75
	III	53,13	19,77%	0,58	19,54	21,13%	0,50	1,07
	IV	47,88	24,41%	0,71	18,39	24,00%	0,53	1,24
400	I	67,83	11,55%	0,28	25,19	11,90%	0,25	0,53
	II	47,81	24,48%	0,59	21,11	17,86%	0,32	0,91
	III	41,09	32,47%	0,78	20,63	18,81%	0,31	1,09
	IV	38,59	36,14%	0,87	20,61	18,84%	0,29	1,16
600	I	63,48	13,43%	0,37	28,27	9,00%	0,22	0,59
	II	48,86	23,46%	0,65	26,68	10,37%	0,22	0,87
	III	44,46	28,14%	0,78	26,26	10,77%	0,21	0,99
	IV	43,14	29,75%	0,82	26,12	10,91%	0,21	1,03
800	I	74,49	9,28%	0,34	34,88	0,00%	0,00	0,34
	II	61,51	14,41%	0,53	34,02	0,00%	0,00	0,53
	III	58,70	15,98%	0,59	34,02	0,00%	0,00	0,59
	IV	58,00	16,40%	0,60	34,01	0,00%	0,00	0,60
1000	I	85,81	6,62%	0,32	44,11	0,00%	0,00	0,32
	II	76,59	8,69%	0,42	43,78	0,00%	0,00	0,42
	III	75,83	8,90%	0,44	43,78	0,00%	0,00	0,44
	IV	75,68	8,94%	0,44	43,77	0,00%	0,00	0,44

Tabela 4.16 – Resultado Total da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Compacta, considerando a Descarga Assimétrica, sem a Presença do Efeito Corona , por 100 km por Ano

Comprimento do Vão (m)	Primeiras Descargas (Pico Duplo) e Descargas Subsequentes	Primeiras Descargas (Pico Único) e Descargas Subsequentes
200	3,02	3,20
400	3,20	3,69
600	2,76	3,48
800	1,34	2,06
1000	1,12	1,62

Tabela 4.17 – Cálculo da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Convencional, considerando a Descarga Simétrica, sem a Presença do Efeito Corona, com Representação da Primeira Descarga com Pico Duplo

Trecho	Primeira Descarga			Descarga Subsequente			Taxa Total de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano
	Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	
I	196,39	0,82%	0,03	76,74	0,00%	0,00	0,03
II	163,63	1,31%	0,04	64,59	0,00%	0,00	0,04
III	145,64	1,76%	0,05	57,66	0,00%	0,00	0,05
IV	137,32	2,04%	0,06	54,67	0,00%	0,00	0,06
I	174,08	1,11%	0,03	72,36	0,00%	0,00	0,03
II	145,97	1,75%	0,05	63,23	0,00%	0,00	0,05
III	136,24	2,09%	0,06	62,01	0,00%	0,00	0,06
IV	133,29	2,20%	0,06	62,01	0,00%	0,00	0,06
I	180,15	1,02%	0,03	78,51	0,00%	0,00	0,03
II	157,19	1,45%	0,04	74,22	0,00%	0,00	0,04
III	150,97	1,60%	0,04	74,21	0,00%	0,00	0,04
IV	149,23	1,65%	0,05	74,15	0,00%	0,00	0,05
I	204,05	0,00%	0,00	92,89	0,00%	0,00	0,00
II	189,78	0,89%	0,03	91,07	0,00%	0,00	0,03
III	187,72	0,92%	0,03	91,06	0,00%	0,00	0,03
IV	186,93	0,93%	0,03	91,02	0,00%	0,00	0,03
I	220,18	0,00%	0,00	112,98	0,00%	0,00	0,00
II	203,74	0,00%	0,00	112,44	0,00%	0,00	0,00
III	198,39	0,80%	0,04	112,44	0,00%	0,00	0,04
IV	196,23	0,82%	0,04	112,44	0,00%	0,00	0,04

Tabela 4.18 – Cálculo da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Convencional, considerando a Descarga Simétrica, sem a Presença do Efeito Corona, com Representação da Primeira Descarga com Pico Único

Trecho	Primeira Descarga			Descarga Subsequente			Taxa Total de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano por Trecho
	Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	
I	179,19	1,03%	0,03	76,74	0,00%	0,00	0,03
II	148,18	1,68%	0,05	64,59	0,00%	0,00	0,05
III	131,11	2,30%	0,07	57,66	0,00%	0,00	0,07
IV	123,24	2,69%	0,08	54,67	0,00%	0,00	0,08
I	155,95	1,48%	0,04	72,36	0,00%	0,00	0,04
II	127,08	2,49%	0,07	63,23	0,00%	0,00	0,07
III	115,54	3,17%	0,08	62,01	0,00%	0,00	0,08
IV	111,28	3,48%	0,09	62,01	0,00%	0,00	0,09
I	157,58	1,44%	0,04	78,51	0,00%	0,00	0,04
II	132,42	2,24%	0,06	74,22	0,00%	0,00	0,06
III	124,25	2,64%	0,07	74,21	0,00%	0,00	0,07
IV	121,77	2,77%	0,08	74,15	0,00%	0,00	0,08
I	177,15	1,06%	0,04	92,89	0,00%	0,00	0,04
II	160,21	1,38%	0,05	91,07	0,00%	0,00	0,05
III	157,38	1,44%	0,05	91,06	0,00%	0,00	0,05
IV	156,73	1,46%	0,05	91,02	0,00%	0,00	0,05
I	191,21	0,87%	0,04	112,98	0,00%	0,00	0,04
II	175,70	1,09%	0,05	112,44	0,00%	0,00	0,05
III	173,01	1,13%	0,05	112,44	0,00%	0,00	0,05
IV	172,33	1,14%	0,05	112,44	0,00%	0,00	0,05

Tabela 4.19 – Resultado Total da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Convencional, considerando a Descarga Simétrica, sem a Presença do Efeito Corona, por 100 km por Ano

Comprimento do Vão (m)	Primeiras Descargas (Pico Duplo) e Descargas Subsequentes	Primeiras Descargas (Pico Único) e Descargas Subsequentes
200	0,18	0,24
400	0,19	0,28
600	0,16	0,25
800	0,10	0,19
1000	0,07	0,19

Tabela 4.20 – Cálculo da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Compacta, considerando a Descarga Simétrica, sem a Presença do Efeito Corona, com Representação da Primeira Descarga com Pico Duplo

Comprimento do Vão (m)	Trecho	Primeira Descarga			Descarga Subsequente			Taxa Total de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano
		Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	
200	I	135,48	2,12%	0,06	52,47	0,00%	0,00	0,06
	II	111,78	3,44%	0,10	43,64	0,00%	0,00	0,10
	III	98,85	4,67%	0,14	38,82	0,00%	0,00	0,14
	IV	92,54	5,50%	0,16	36,77	0,00%	0,00	0,16
400	I	116,98	3,07%	0,07	48,15	0,00%	0,00	0,07
	II	97,39	4,85%	0,12	41,86	0,00%	0,00	0,12
	III	90,69	5,78%	0,14	41,00	0,00%	0,00	0,14
	IV	88,66	6,11%	0,15	41,00	0,00%	0,00	0,15
600	I	122,81	2,71%	0,07	53,16	0,00%	0,00	0,07
	II	106,52	3,88%	0,11	50,18	0,00%	0,00	0,11
	III	102,04	4,32%	0,12	50,24	0,00%	0,00	0,12
	IV	100,78	4,46%	0,12	50,24	0,00%	0,00	0,12
800	I	142,69	1,85%	0,07	64,40	0,00%	0,00	0,07
	II	132,14	2,25%	0,08	63,03	0,00%	0,00	0,08
	III	130,64	2,32%	0,09	63,13	0,00%	0,00	0,09
	IV	130,11	2,34%	0,09	63,04	0,00%	0,00	0,09
1000	I	156,12	1,47%	0,07	79,60	0,00%	0,00	0,07
	II	144,31	1,80%	0,09	79,14	0,00%	0,00	0,09
	III	140,61	1,92%	0,09	79,14	0,00%	0,00	0,09
	IV	139,09	1,98%	0,10	79,12	0,00%	0,00	0,10

Tabela 4.21 - Cálculo da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Compacta, considerando a Descarga Simétrica, sem a Presença do Efeito Corona, com Representação da Primeira Descarga com Pico Único

Comprimento do Vão (m)	Trecho	Primeira Descarga			Descarga Subsequente			Taxa Total de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano por Trecho
		Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	
200	I	123,87	2,66%	0,08	52,47	0,00%	0,00	0,08
	II	101,40	4,39%	0,13	43,64	0,00%	0,00	0,13
	III	89,22	6,02%	0,18	38,82	0,00%	0,00	0,18
	IV	83,67	7,03%	0,21	36,77	0,00%	0,00	0,21
400	I	105,06	4,02%	0,10	48,15	0,00%	0,00	0,10
	II	84,92	6,79%	0,16	41,86	0,00%	0,00	0,16
	III	76,97	8,59%	0,21	41,00	0,00%	0,00	0,21
	IV	74,05	9,41%	0,23	41,00	0,00%	0,00	0,23
600	I	107,37	3,81%	0,11	53,16	0,00%	0,00	0,11
	II	89,76	5,93%	0,16	50,18	0,00%	0,00	0,16
	III	83,99	6,97%	0,19	50,24	0,00%	0,00	0,19
	IV	82,22	7,34%	0,20	50,24	0,00%	0,00	0,20
800	I	123,89	2,65%	0,10	64,40	0,00%	0,00	0,10
	II	111,45	3,47%	0,13	63,03	0,00%	0,00	0,13
	III	109,27	3,64%	0,13	63,13	0,00%	0,00	0,13
	IV	108,87	3,68%	0,14	63,04	0,00%	0,00	0,14
1000	I	135,69	2,11%	0,10	79,60	0,00%	0,00	0,10
	II	124,40	2,63%	0,13	79,14	0,00%	0,00	0,13
	III	122,51	2,73%	0,13	79,14	0,00%	0,00	0,13
	IV	122,03	2,76%	0,13	79,12	0,00%	0,00	0,13

Tabela 4.22 - Resultado Total da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Compacta, considerando a Descarga Simétrica, sem a Presença do Efeito Corona, por 100 km por Ano

Comprimento do Vão (m)	Primeiras Descargas (Pico Duplo) e Descargas Subsequentes	Primeiras Descargas (Pico Único) e Descargas Subsequentes
200	0,46	0,59
400	0,48	0,69
600	0,42	0,66
800	0,32	0,49
1000	0,35	0,50

É possível verificar os trechos do vão que mais influenciam no cálculo da taxa de ruptura a meio de vão. No caso de primeiras descargas os trechos mais distantes do centro do vão possuem valores médios de corrente crítica relativamente maiores e, com isso, contribuem menos para a taxa de ruptura. Essa diferença de valores diminui quando o vão se torna mais longo, o que permite que os trechos mais próximos das torres tenham maior influência. Ao se considerar os resultados de descargas subsequentes, a variação do valor médio de corrente crítica e um trecho para o outro é bastante reduzida.

Analisando as taxas calculadas de ruptura a meio de vão, verifica-se que os maiores valores, tanto para a torre convencional quanto para a compacta, foram encontrados dentro da faixa de comprimentos de vão entre 200 m e 600 m, que tem sua importância, conforme já mencionado, pelo fato de ser uma faixa de comprimentos de vão muito usual em linhas de 500 kV. O valor máximo foi calculado para vãos de 400 m em todas as situações, mostrando ser o comprimento de vão mais crítico dentro da faixa de comprimentos em análise.

Como esperado, ao se considerar a representação da primeira descarga com pico único, obteve-se maiores taxas de ruptura a meio de vão em relação à representação da forma de onda de primeira descarga com pico duplo. Como já discutido, apesar da aplicação da forma de onda de corrente com pico único apresentar resultados mais conservativos, tal representação não é precisa em relação às formas de onda de corrente de primeira descarga típicas que se observa em medições na prática.

As descargas subsequentes mostraram ter influência na taxa de ruptura a meio de vão quando foram injetadas de forma assimétrica e sem a representação do efeito corona, em vãos cujo comprimento se situa entre 200 m e 400 m para a torre convencional e entre 200 m e 600 m para a torre compacta. Quando descargas simétricas foram injetadas ao longo do vão, não foi computada nenhuma contribuição das descargas subsequentes à taxa de ruptura.

Ficou claro que a ocorrência de descargas simétricas, bem como a ruptura do isolamento entre os cabos pára-raios, é capaz de reduzir significativamente a taxa de ruptura a meio de

vão. Portanto, é necessário se verificar a possibilidade de ocorrência de uma ruptura entre os cabos pára-raios antes que haja a ruptura a meio de vão, pois tal fenômeno influencia de forma significativa o desempenho da linha.

Através dos resultados apresentados, observa-se que a ruptura a meio de vão não é desprezível e pode influenciar no desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. No entanto, é necessário avaliar outro fator importante nessa análise, que é a influência do efeito corona. Tal fenômeno influencia diretamente as sobretensões resultantes.

#### ***4.5.4 Obtenção da Taxa de Ruptura a Meio de Vão com a Consideração do Efeito Corona***

Nesse item é detalhado o processo de cômputo do efeito corona nas simulações, os novos valores de sobretensão e corrente crítica e o cálculo da taxa de ruptura a meio de vão considerando tal efeito.

Foram sintetizadas formas de onda de corrente de primeira descarga e descarga subsequente, assumindo valores de amplitude máxima iguais aos de corrente crítica calculados sem a presença do efeito corona no item 4.5.3 desta dissertação. A partir da injeção de tais correntes ao longo dos vãos em análise, obtêm-se as sobretensões no cabo ou nos cabos pára-raios e na fase mais próxima que resultam em uma ruptura a meio de vão.

Ao se utilizar a equação 4.3, têm-se o raio equivalente dos feixes de sub-condutores das fases. Para o feixe da torre convencional, tem-se um valor igual a 0,19 m e para a torre compacta um valor igual a 0,21 m.

O próximo passo é calcular um novo valor de raio para o cabo pára-raios, em caso de descarga assimétrica ou para cada cabo pára-raios em caso de descarga simétrica, e para o feixe de sub-condutores da fase mais próxima, utilizando as equações 4.1 e 4.2. Os valores de sobretensão nos cabos e nas fases e os respectivos novos valores de raio efetivo são apresentados nas figuras 4.41 e 4.42 para descargas assimétricas e figuras 4.43 e 4.44 para



as descargas simétricas.

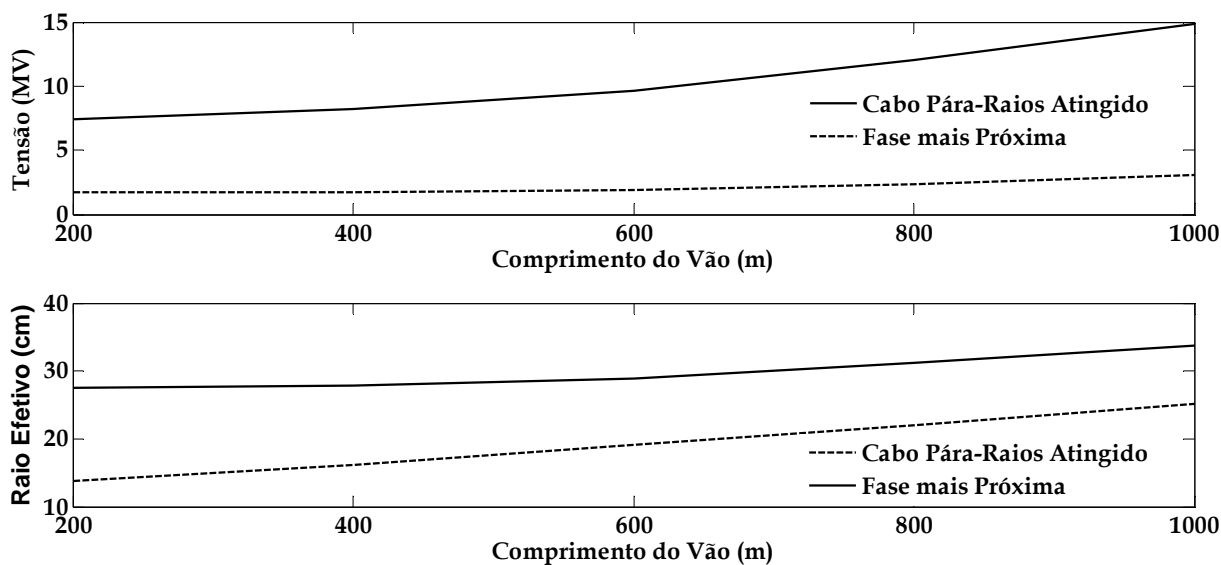


Figura 4.41 – Sobretensões no Cabo Pára-Raios e na Fase Mais Próxima que Resultam na Ocorrência de Ruptura a Meio de Vão e os Respetivos Raios Efetivos, considerando a Incidência de Descarga Assimétrica, para a Configuração de Torre Convencional

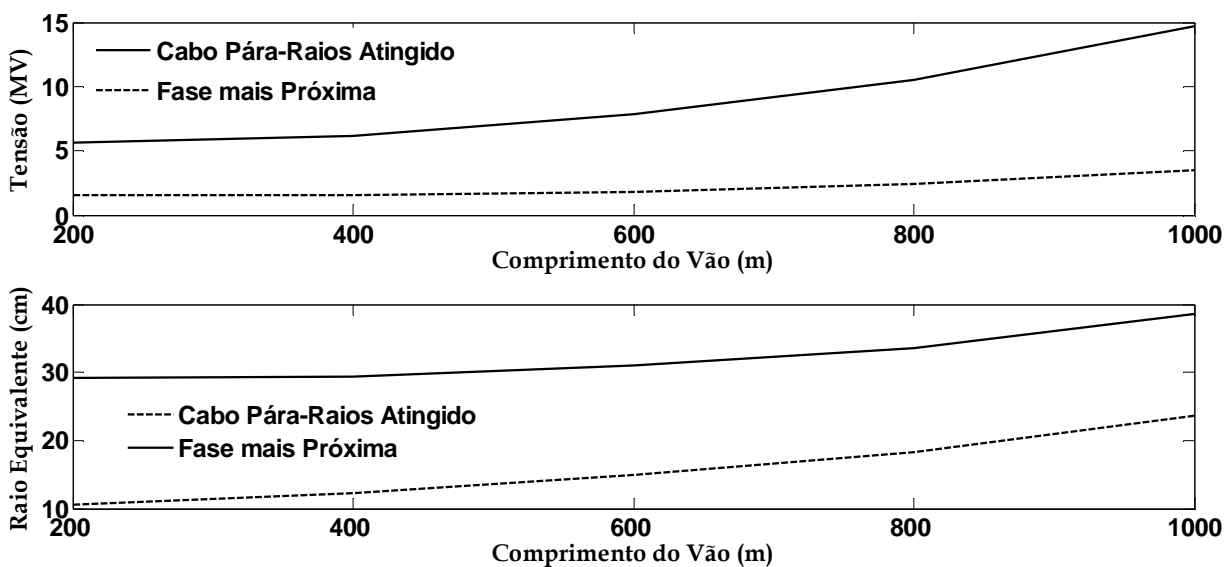


Figura 4.42 -- Sobretensões no Cabo Pára-Raios e na Fase Mais Próxima que Resultam na Ocorrência de Ruptura a Meio de Vão e Respetivos Raios Efetivos, considerando a Incidência de Descarga Assimétrica, para a Configuração de Torre Compacta

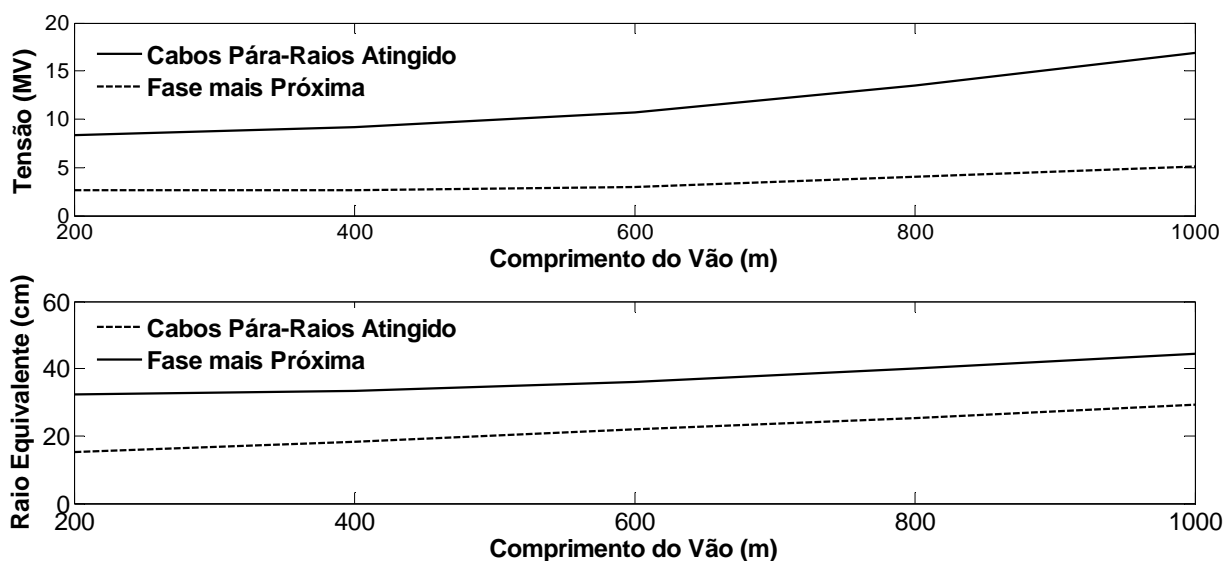


Figura 4.43 -- Sobretensões nos Cabos Pára-Raios e na Fase Mais Próxima que Resultam na Ocorrência de Ruptura a Meio de Vão e Respectivos Raios Efetivos, considerando a Incidência de Descarga Simétrica, para a Configuração de Torre Convencional

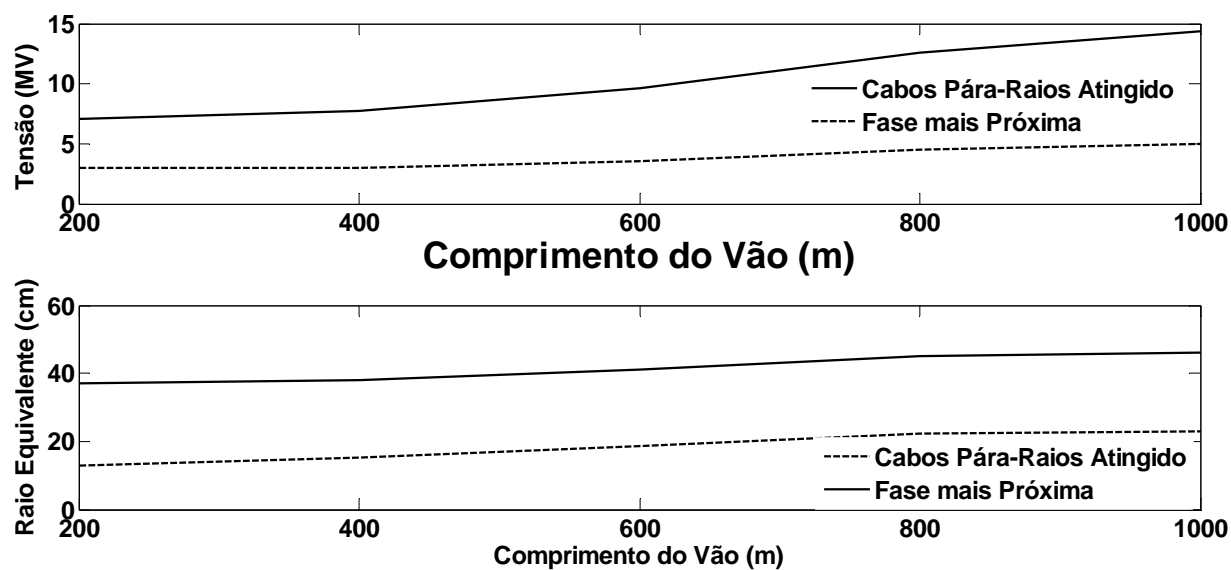


Figura 4.44 -- Sobretensões nos Cabos Pára-Raios e na Fase Mais Próxima que Resultam na Ocorrência de Ruptura a Meio de Vão e Respectivos Raios Efetivos, considerando a Incidência de Descarga Simétrica, para a Configuração de Torre Compacta

O raio efetivo do feixe de sub-condutores fase mais próximo e do cabo pára-raios onde a corrente foi injetada, para descargas assimétricas, ou dos dois cabos pára-raios, para descargas simétricas foram então corrigidos no ATPDraw conforme os valores

apresentados, ao longo de todo o vão onde ocorreu a incidência. Os procedimentos de aquisição das sobretensões e de cálculo da corrente crítica foram repetidos. Considerando descargas assimétricas, as figuras 4.49, 4.50 e 4.51 mostram os resultados para a torre convencional e as figuras 4.52, 4.53 e 4.54 mostram os resultados para a torre compacta. Já para descargas simétricas, os resultados são mostrados nas figuras 4.55, 4.56 e 4.57 para a torre convencional e 4.58, 4.59 e 4.60 para a torre compacta.

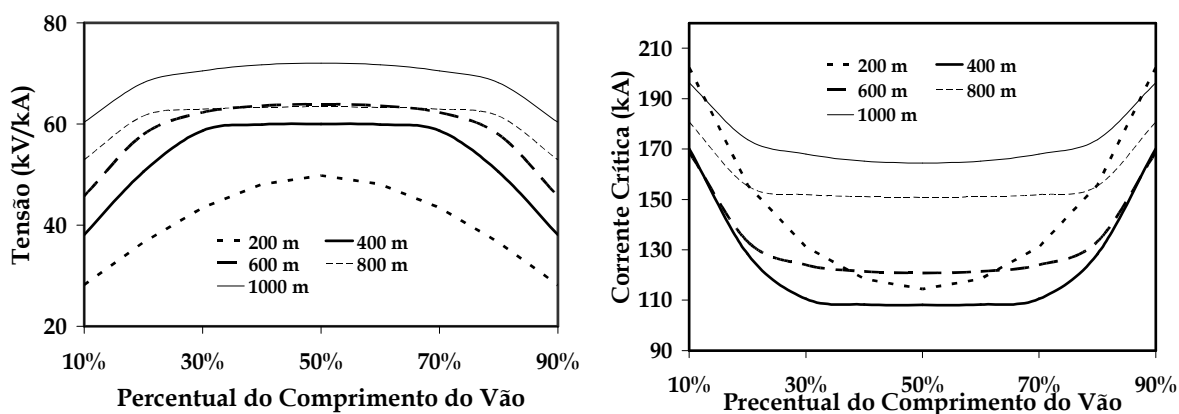


Figura 4.49 – Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Convencional, com a Consideração do Efeito Corona (Primeiras Descargas Assimétricas – Pico Duplo)

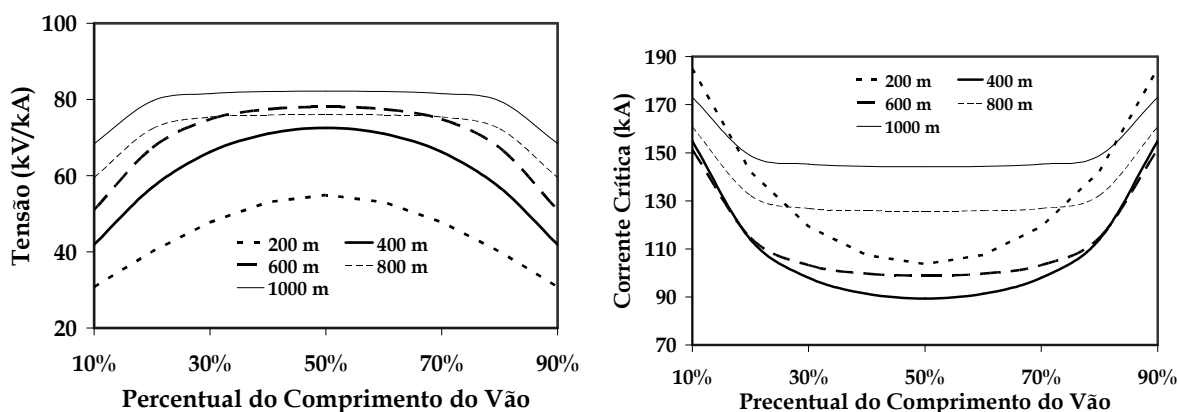


Figura 4.50 – Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Convencional, com a Consideração do Efeito Corona (Primeiras Descargas Assimétricas – Pico Único)

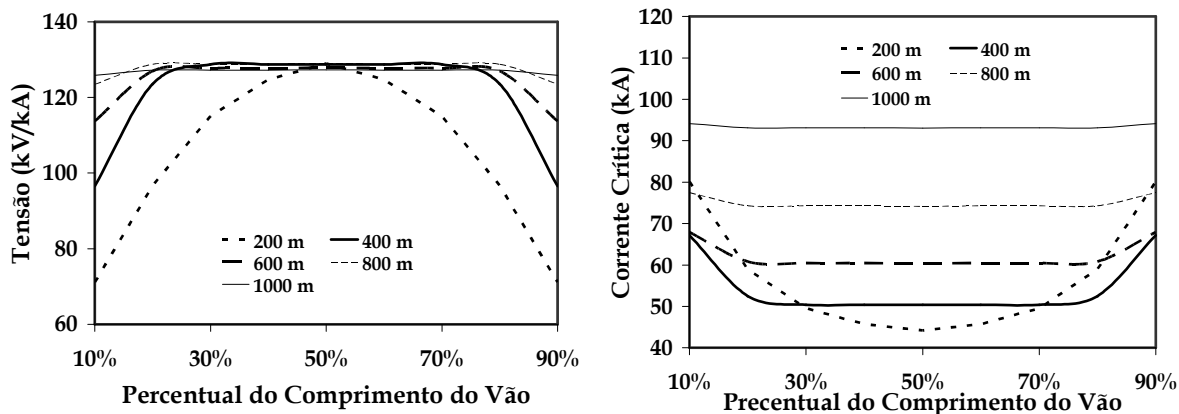


Figura 4.51 – Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Convencional, com a Consideração do Efeito Corona (Descargas Assimétricas Subseqüentes)

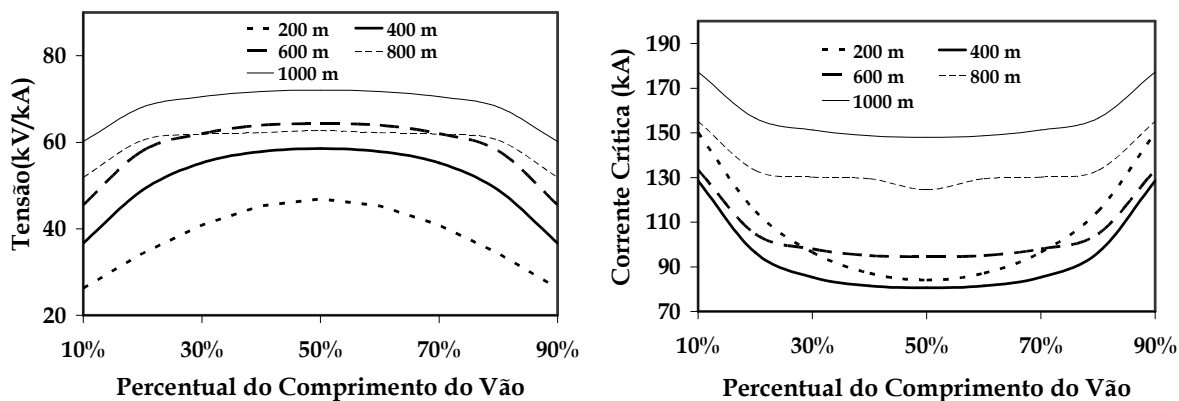


Figura 4.52 – Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Compacta, com a Consideração do Efeito Corona (Primeiras Descargas Assimétricas – Pico Duplo)

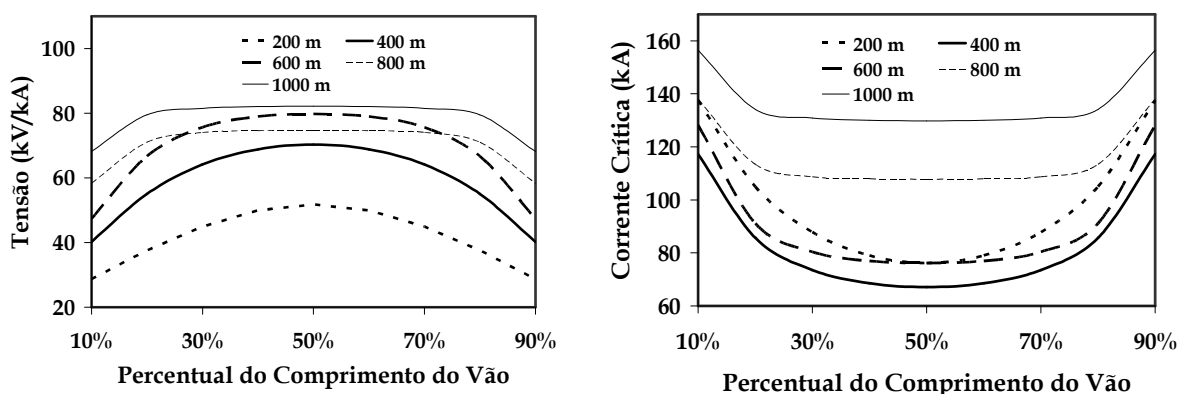


Figura 4.53 – Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Compacta, com a Consideração do Efeito Corona (Primeiras Descargas Assimétricas – Pico Único)

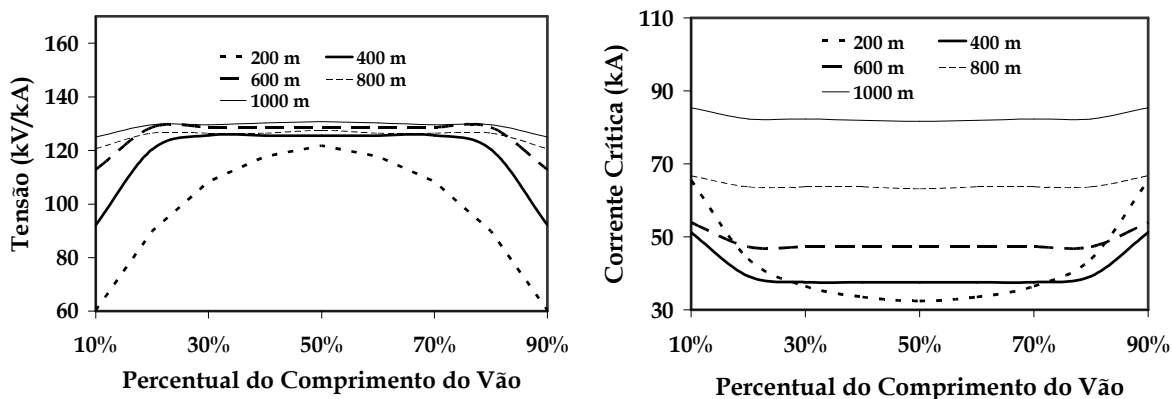


Figura 4.54 – Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Compacta, com a Consideração do Efeito Corona (Descargas Assimétricas Subseqüentes)

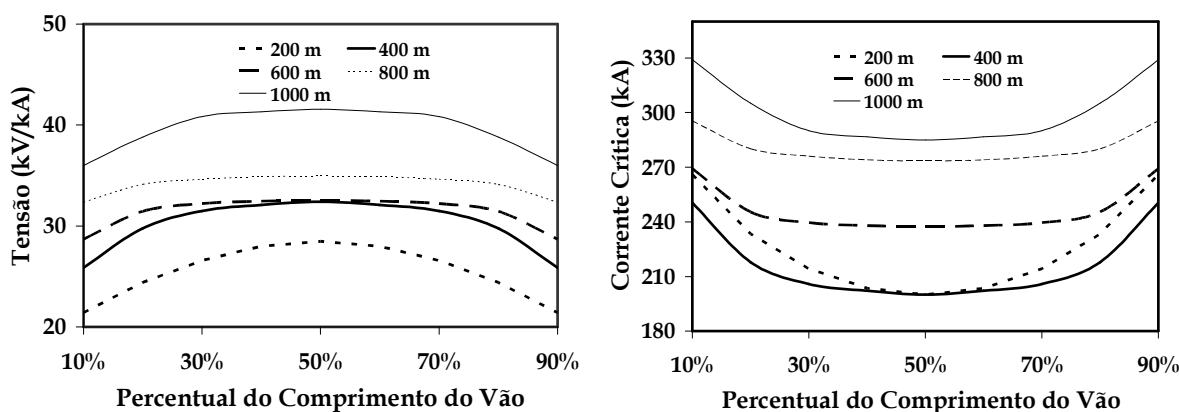


Figura 4.55 – Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Convencional, com a Consideração do Efeito Corona (Primeiras Descargas Simétricas – Pico Duplo)

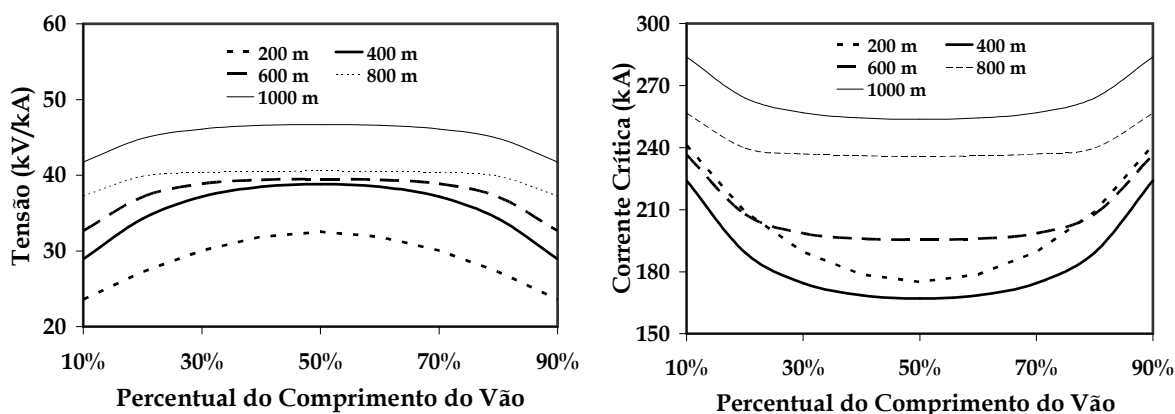


Figura 4.56 – Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Convencional, com a Consideração do Efeito Corona (Primeiras Descargas Simétricas – Pico Único)

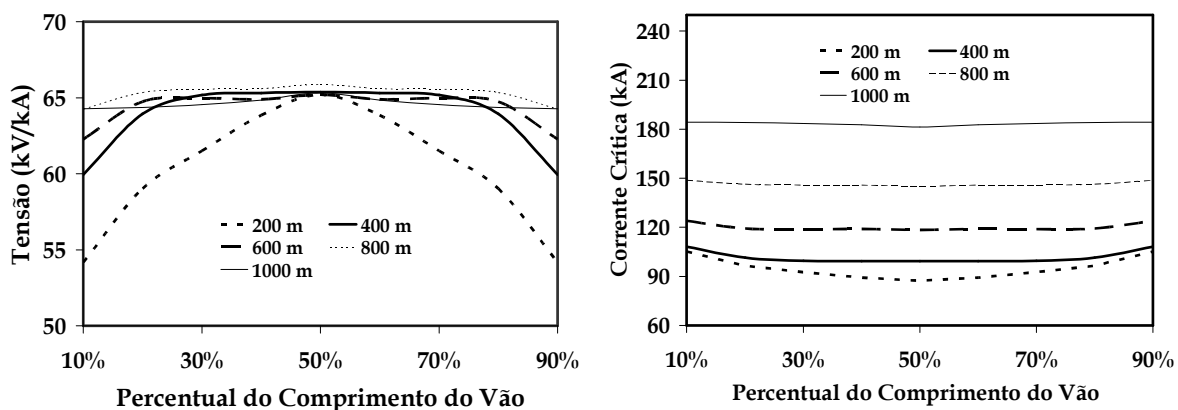


Figura 4.57 - Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Convencional, com a Consideração do Efeito Corona (Descargas Simétricas Subseqüentes)

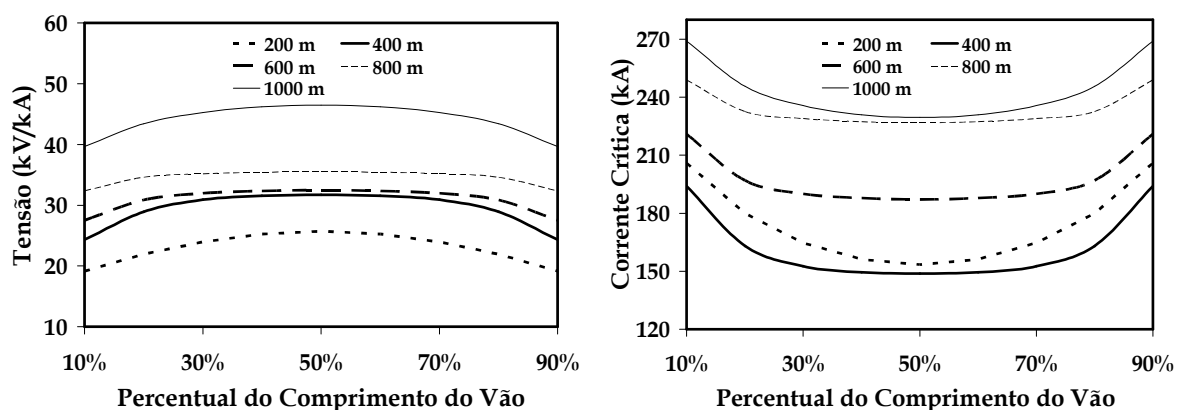


Figura 4.58 - Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Compacta, com a Consideração do Efeito Corona (Primeiras Descargas Simétricas - Pico Duplo)

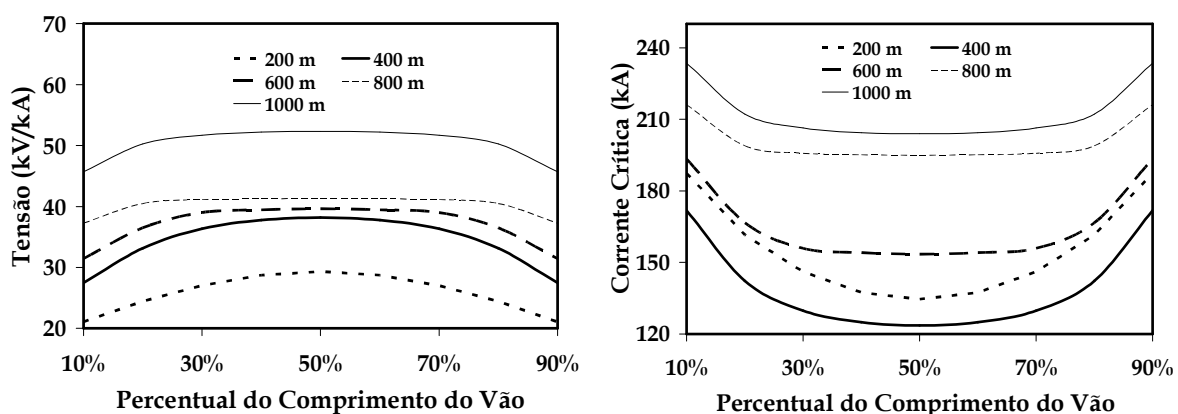


Figura 4.59 - Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Compacta, com a Consideração do Efeito Corona (Primeiras Descargas Simétricas - Pico Único)

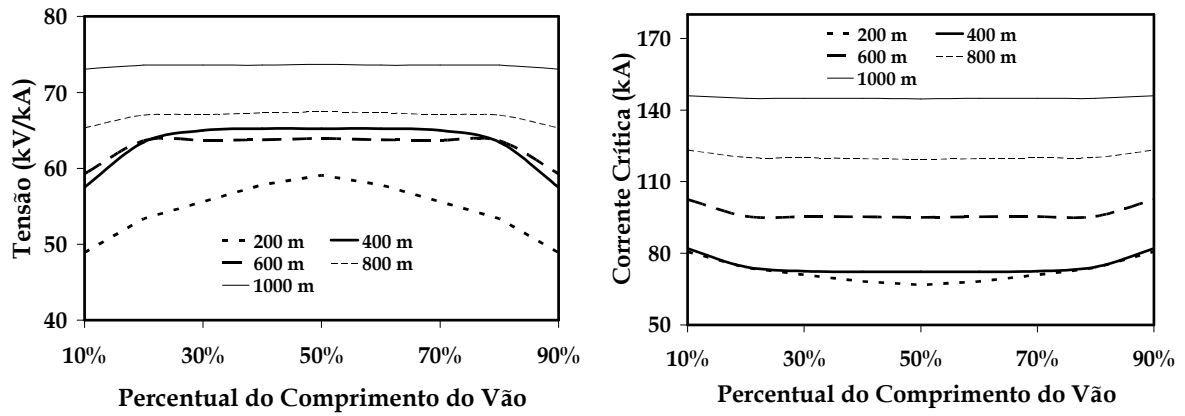


Figura 4.60 – Resultados de Tensão Máxima e Corrente Crítica no Ponto de Incidência ao Longo dos Vãos em Análise para a Torre Compacta, com a Consideração do Efeito Corona (Descargas Simétricas Subseqüentes)

As sobretensões resultantes sofrem uma considerável redução em sua amplitude, causando, conseqüentemente, um aumento nos valores de corrente crítica. As figuras 4.61, 4.62, 4.63 e 4.64 ilustram esse aumento, para descargas incidentes nos ponto central do vão.

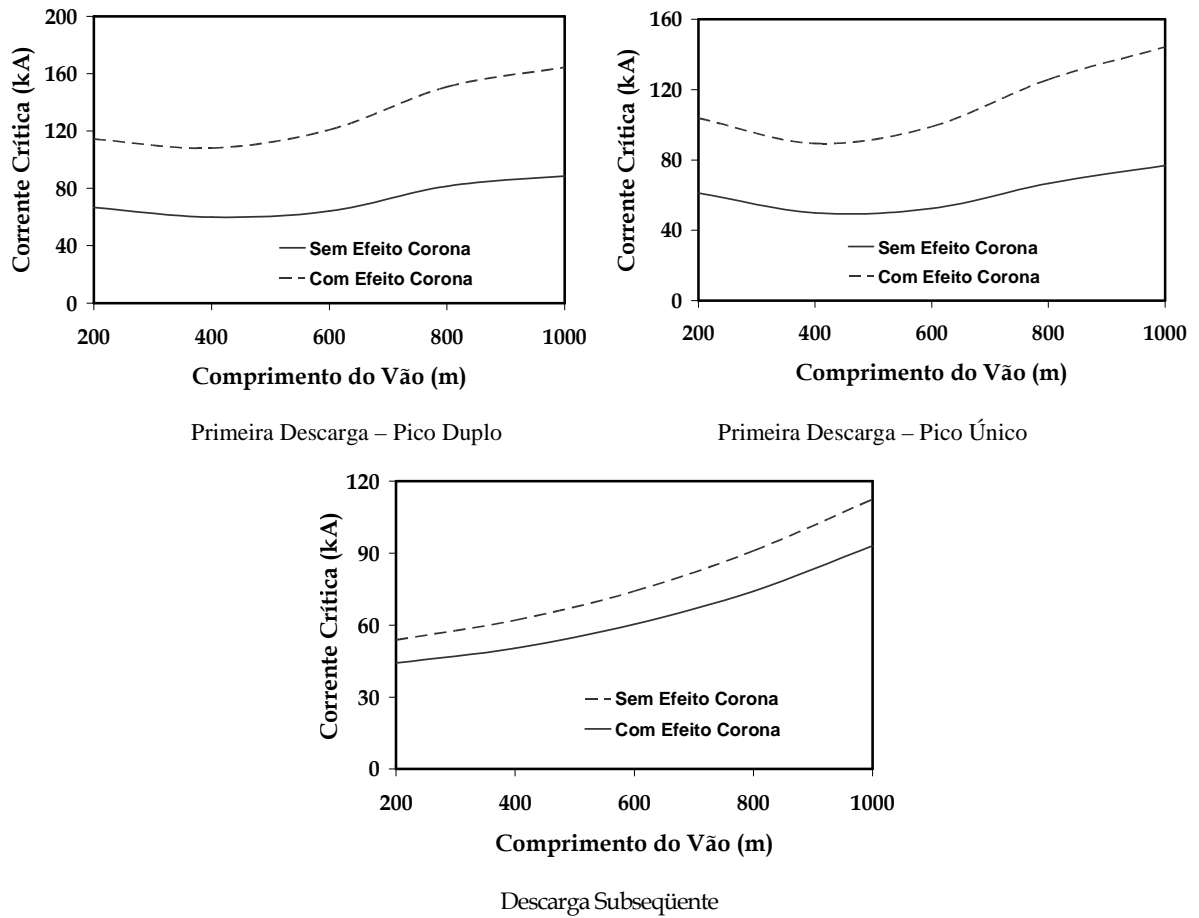
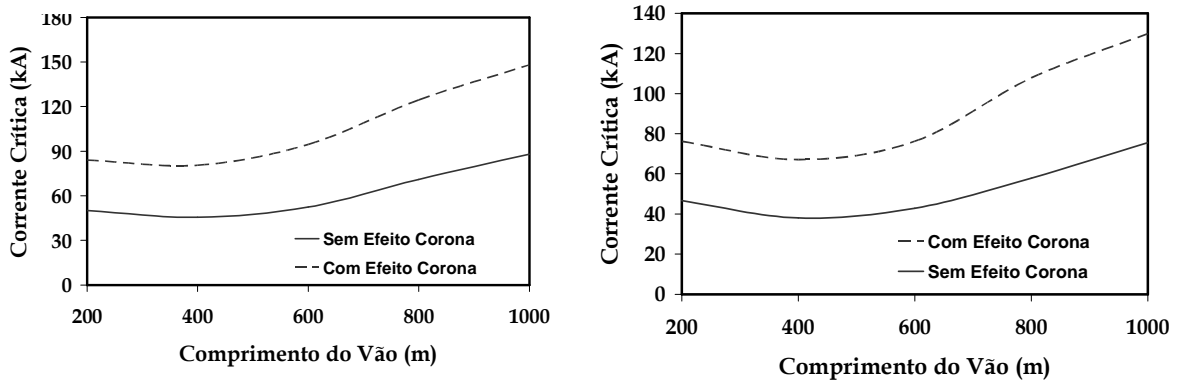


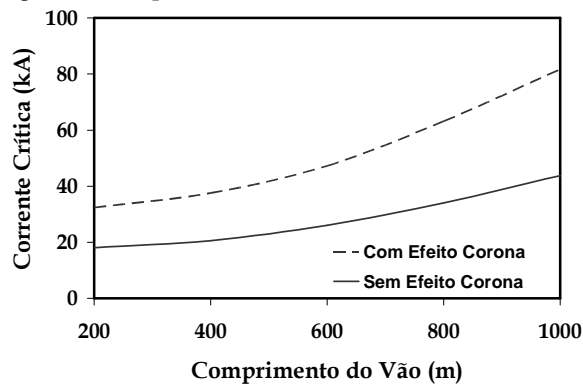
Figura 4.61 – Comparação entre Valores de Corrente Crítica Obtidos a Partir de Injeção de Descargas Assimétricas no Ponto Central dos Vãos em Análise, com a Consideração do Efeito Corona para a Torre Convencional





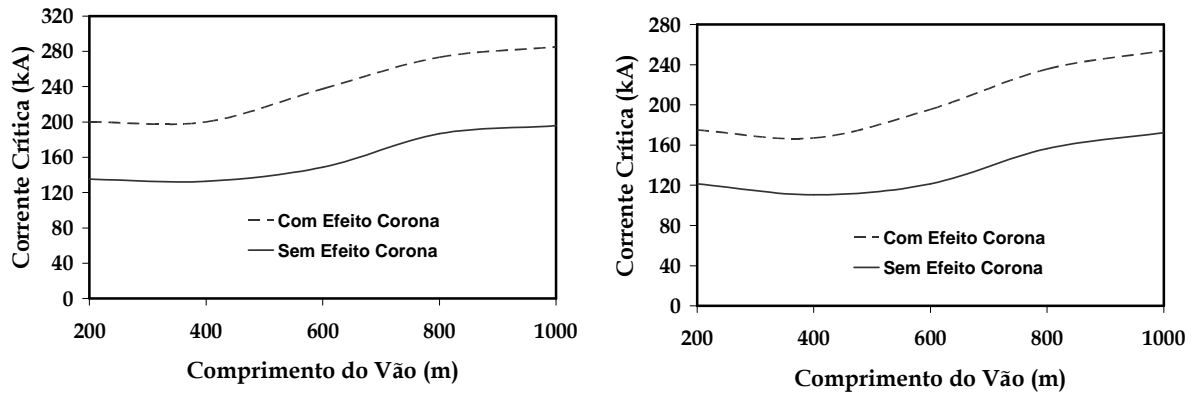
Primeira Descarga - Pico Duplo

Primeira Descarga - Pico Único



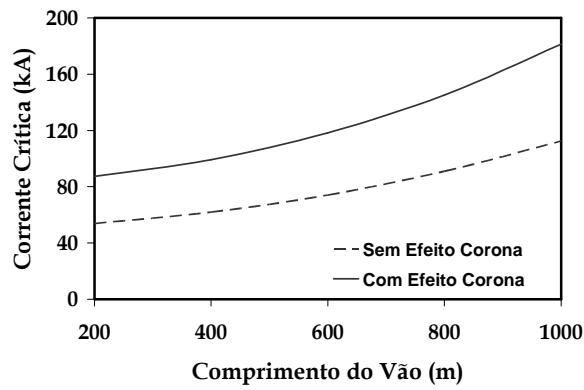
Descarga Subseqüente

Figura 4.62 – Comparação entre Valores de Corrente Crítica Obtidos a Partir de Injeção de Descargas Assimétricas no Ponto Central dos Vãos em Análise, com a Consideração do Efeito Corona para a Torre Compacta



Primeira Descarga - Pico Duplo

Primeira Descarga - Pico Único



Descarga Subseqüente

Figura 4.63 – Comparação entre Valores de Corrente Crítica Obtidos a Partir de Injeção de Descargas Simétricas no Ponto Central dos Vãos em Análise, com a Consideração do Efeito Corona para a Torre Convencional

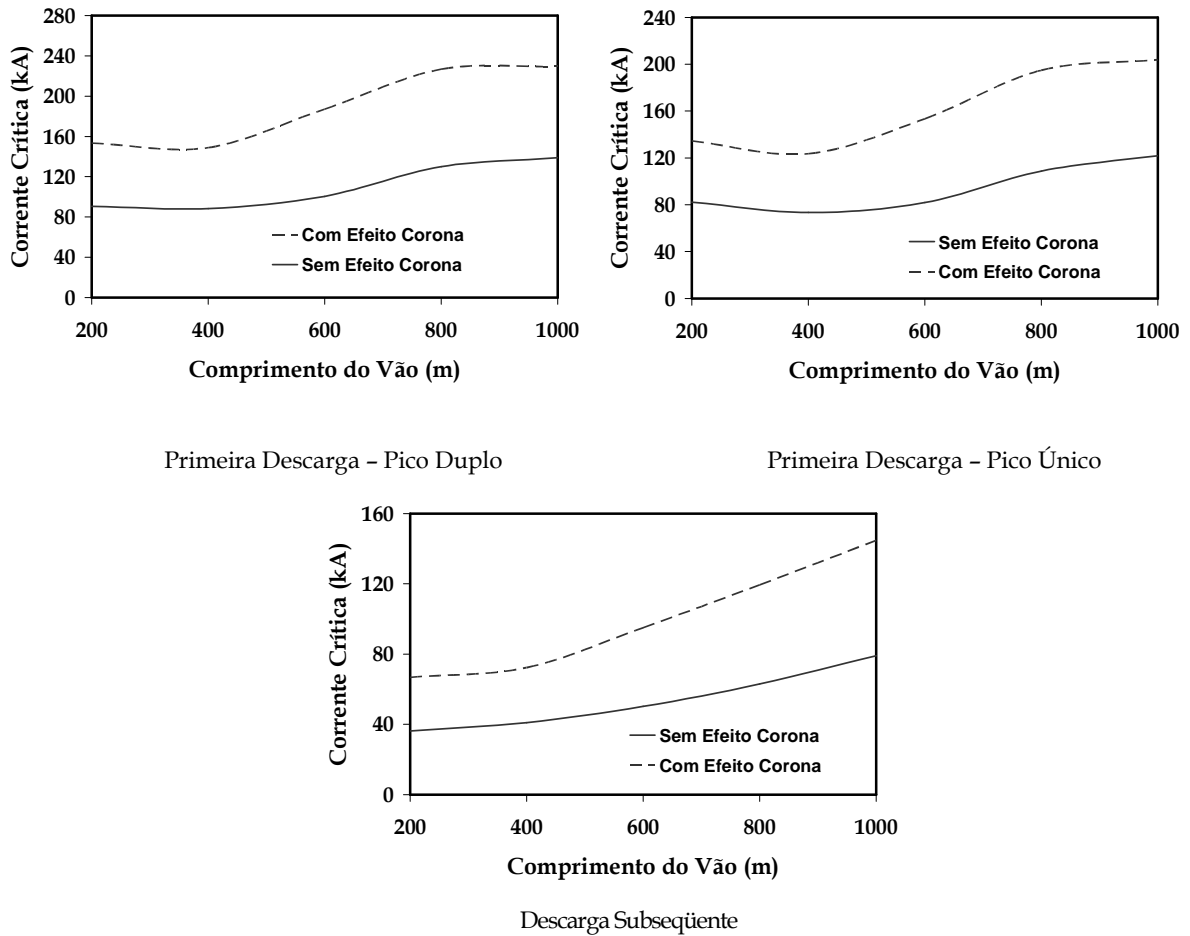


Figura 4.64 – Comparação entre Valores de Corrente Crítica Obtidos a Partir de Injeção de Descargas Simétricas no Ponto Central dos Vãos em Análise, com a Consideração do Efeito Corona para a Torre Compacta

A partir dos novos valores de corrente crítica, é possível recalculer as taxas de ruptura a meio de vão. Para as incidências de descargas assimétricas, as tabelas 4.23, 4.24 e 4.25 mostram os resultados para a torre convencional, enquanto as tabelas 4.26, 4.27 e 4.28 indicam os valores obtidos para a torre compacta. Considerando as incidências de descargas simétricas, os resultados são mostrados nas tabelas 4.29, 4.30 e 4.31 para a torre convencional e nas tabelas 4.32, 4.33 e 4.34 para a torre compacta.

Tabela 4.23 - Cálculo da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Convencional, considerando a Descarga Assimétrica, com a Presença do Efeito Corona, com Representação da Primeira Descarga com Pico Duplo

Comprimento do Vão (m)	Trecho	Primeira Descarga			Descarga Subseqüente			Taxa Total de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano
		Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	
200	I	170,98	1,17%	0,04	69,50	0,00%	0,00	0,04
	II	143,43	1,83%	0,06	54,22	0,00%	0,00	0,06
	III	124,80	2,61%	0,08	47,60	0,00%	0,00	0,08
	IV	116,42	3,11%	0,10	44,94	0,00%	0,00	0,10
400	I	149,25	1,65%	0,04	59,83	0,00%	0,00	0,04
	II	119,40	2,91%	0,08	51,44	0,00%	0,00	0,08
	III	109,39	3,63%	0,10	50,38	0,00%	0,00	0,10
	IV	108,19	3,73%	0,10	50,38	0,00%	0,00	0,10
600	I	150,96	1,60%	0,04	64,18	0,00%	0,00	0,04
	II	128,61	2,41%	0,07	60,46	0,00%	0,00	0,07
	III	122,69	2,72%	0,07	60,46	0,00%	0,00	0,07
	IV	121,09	2,81%	0,08	60,46	0,00%	0,00	0,08
800	I	167,98	1,22%	0,04	75,86	0,00%	0,00	0,04
	II	153,61	1,54%	0,05	74,27	0,00%	0,00	0,05
	III	151,53	1,59%	0,06	74,27	0,00%	0,00	0,06
	IV	150,97	1,60%	0,06	74,22	0,00%	0,00	0,06
1000	I	185,00	0,95%	0,04	93,62	0,00%	0,00	0,04
	II	170,86	1,17%	0,05	93,11	0,00%	0,00	0,05
	III	166,59	1,25%	0,06	93,11	0,00%	0,00	0,06
	IV	164,81	1,28%	0,06	93,11	0,00%	0,00	0,06

Tabela 4.24 - Cálculo da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Convencional, considerando a Descarga Assimétrica, com a Presença do Efeito Corona, com Representação da Primeira Descarga com Pico Único

Comprimento do Vão (m)	Trecho	Primeira Descarga			Descarga Subseqüente			Taxa Total de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano por Trecho
		Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	
200	I	163,63	1,31%	0,04	69,50	0,00%	0,00	0,04
	II	130,77	2,31%	0,07	54,22	0,00%	0,00	0,07
	III	113,39	3,32%	0,10	47,60	0,00%	0,00	0,10
	IV	105,59	3,97%	0,12	44,94	0,00%	0,00	0,12
400	I	134,41	2,16%	0,06	59,83	0,00%	0,00	0,06
	II	105,99	3,93%	0,11	51,44	0,00%	0,00	0,11
	III	94,67	5,20%	0,14	50,38	0,00%	0,00	0,14
	IV	90,35	5,83%	0,16	50,38	0,00%	0,00	0,16
600	I	133,03	2,22%	0,06	64,18	0,00%	0,00	0,06
	II	108,99	3,67%	0,10	60,46	0,00%	0,00	0,10
	III	101,48	4,38%	0,12	60,46	0,00%	0,00	0,12
	IV	99,34	4,62%	0,13	60,46	0,00%	0,00	0,13
800	I	146,51	1,73%	0,06	75,86	0,00%	0,00	0,06
	II	129,56	2,37%	0,08	74,27	0,00%	0,00	0,08
	III	126,40	2,52%	0,09	74,27	0,00%	0,00	0,09
	IV	125,85	2,55%	0,09	74,22	0,00%	0,00	0,09
1000	I	160,97	1,36%	0,06	93,62	0,00%	0,00	0,06
	II	147,06	1,72%	0,08	93,11	0,00%	0,00	0,08
	III	144,82	1,78%	0,08	93,11	0,00%	0,00	0,08
	IV	144,26	1,80%	0,08	93,11	0,00%	0,00	0,08

Tabela 4.25 - Resultado Total da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Convencional, considerando a Descarga Assimétrica, com a Presença do Efeito Corona, por 100 km por Ano

Comprimento do Vão (m)	Primeiras Descargas (Pico Duplo) e Descargas Subseqüentes	Primeiras Descargas (Pico Único) e Descargas Subseqüentes
200	0,27	0,34
400	0,32	0,46
600	0,26	0,41
800	0,21	0,32
1000	0,21	0,30

Tabela 4.26 – Cálculo da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Compacta, considerando a Descarga Assimétrica, com a Presença do Efeito Corona, com Representação da Primeira Descarga com Pico Duplo

Comprimento do Vão (m)	Trecho	Primeira Descarga			Descarga Subseqüente			Taxa Total de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano
		Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	
200	I	132,49	2,24%	0,07	54,68	0,00%	0,00	0,07
	II	105,71	3,96%	0,12	40,16	0,00%	0,00	0,12
	III	91,82	5,61%	0,16	34,96	0,00%	0,00	0,16
	IV	85,60	6,66%	0,19	32,95	0,00%	0,00	0,19
400	I	112,46	3,39%	0,08	45,19	0,00%	0,00	0,08
	II	90,86	5,76%	0,14	38,37	0,00%	0,00	0,14
	III	83,44	7,08%	0,17	37,55	0,00%	0,00	0,17
	IV	81,05	7,59%	0,18	37,56	0,00%	0,00	0,18
600	I	119,07	2,93%	0,08	50,57	0,00%	0,00	0,08
	II	101,38	4,39%	0,12	47,24	0,00%	0,00	0,12
	III	96,55	4,96%	0,14	47,23	0,00%	0,00	0,14
	IV	94,80	5,19%	0,14	47,23	0,00%	0,00	0,14
800	I	144,18	1,81%	0,07	65,20	0,00%	0,00	0,07
	II	131,68	2,27%	0,08	63,67	0,00%	0,00	0,08
	III	129,84	2,36%	0,09	63,67	0,00%	0,00	0,09
	IV	126,99	2,49%	0,09	63,41	0,00%	0,00	0,09
1000	I	166,91	1,24%	0,06	83,83	0,00%	0,00	0,06
	II	153,89	1,53%	0,07	82,31	0,00%	0,00	0,07
	III	149,97	1,63%	0,08	82,11	0,00%	0,00	0,08
	IV	148,35	1,68%	0,08	81,76	0,00%	0,00	0,08

Tabela 4.27 – Cálculo da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Compacta, considerando a Descarga Assimétrica, com a Presença do Efeito Corona, com Representação da Primeira Descarga com Pico Único

Comprimento do Vão (m)	Trecho	Primeira Descarga			Descarga Subseqüente			Taxa Total de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano por Trecho
		Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	
200	I	121,25	2,80%	0,08	54,68	0,00%	0,00	0,08
	II	96,42	4,97%	0,15	40,16	0,00%	0,00	0,15
	III	83,42	7,09%	0,21	34,96	0,00%	0,00	0,21
	IV	77,60	8,43%	0,25	32,95	0,00%	0,00	0,25
400	I	101,46	4,38%	0,11	45,19	0,00%	0,00	0,11
	II	79,60	7,93%	0,19	38,37	0,00%	0,00	0,19
	III	71,03	10,38%	0,25	37,55	0,00%	0,00	0,25
	IV	67,80	11,56%	0,28	37,56	0,00%	0,00	0,28
600	I	109,68	3,61%	0,10	50,57	0,00%	0,00	0,10
	II	85,76	6,63%	0,18	47,24	0,00%	0,00	0,18
	III	78,67	8,16%	0,23	47,23	0,00%	0,00	0,23
	IV	76,57	8,70%	0,24	47,23	0,00%	0,00	0,24
800	I	125,70	2,56%	0,09	65,20	0,00%	0,00	0,09
	II	111,07	3,50%	0,13	63,67	0,00%	0,00	0,13
	III	108,34	3,72%	0,14	63,67	0,00%	0,00	0,14
	IV	107,86	3,76%	0,14	63,41	0,00%	0,00	0,14
1000	I	145,32	1,77%	0,09	83,83	0,00%	0,00	0,09
	II	132,54	2,24%	0,11	82,31	0,00%	0,00	0,11
	III	130,45	2,33%	0,11	82,11	0,00%	0,00	0,11
	IV	129,91	2,35%	0,12	81,76	0,00%	0,00	0,12

Tabela 4.28 – Resultado Total da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Compacta, considerando a Descarga Assimétrica, com a Presença do Efeito Corona, por 100 km por Ano

Comprimento do Vão (m)	Primeiras Descargas (Pico Duplo) e Descargas Subseqüentes	Primeiras Descargas (Pico Único) e Descargas Subseqüentes
200	0,54	0,68
400	0,57	0,82
600	0,48	0,75
800	0,33	0,50
1000	0,30	0,42

Tabela 4.29 – Cálculo da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Convencional, considerando a Descarga Simétrica, com a Presença do Efeito Corona, com Representação da Primeira Descarga com Pico Duplo

Comprimento do Vão (m)	Trecho	Primeira Descarga			Descarga Subseqüente			Taxa Total de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano
		Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	
200	I	249,69	0,00%	0,00	100,85	0,00%	0,00	0,00
	II	223,84	0,00%	0,00	94,57	0,00%	0,00	0,00
	III	208,91	0,00%	0,00	90,93	0,00%	0,00	0,00
	IV	201,76	0,00%	0,00	88,30	0,00%	0,00	0,00
400	I	234,19	0,00%	0,00	104,81	0,00%	0,00	0,00
	II	211,88	0,00%	0,00	100,37	0,00%	0,00	0,00
	III	204,01	0,00%	0,00	99,40	0,00%	0,00	0,00
	IV	201,09	0,00%	0,00	99,36	0,00%	0,00	0,00
600	I	257,32	0,00%	0,00	121,43	0,00%	0,00	0,00
	II	242,54	0,00%	0,00	119,07	0,00%	0,00	0,00
	III	238,76	0,00%	0,00	119,13	0,00%	0,00	0,00
	IV	237,69	0,00%	0,00	118,72	0,00%	0,00	0,00
800	I	287,83	0,00%	0,00	147,34	0,00%	0,00	0,00
	II	278,15	0,00%	0,00	146,10	0,00%	0,00	0,00
	III	275,10	0,00%	0,00	148,36	0,00%	0,00	0,00
	IV	273,75	0,00%	0,00	147,77	0,00%	0,00	0,00
1000	I	317,14	0,00%	0,00	183,77	0,00%	0,00	0,00
	II	297,64	0,00%	0,00	183,80	0,00%	0,00	0,00
	III	288,38	0,00%	0,00	183,39	0,00%	0,00	0,00
	IV	285,83	0,00%	0,00	182,02	0,00%	0,00	0,00



Tabela 4.30 – Cálculo da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Convencional, considerando a Descarga Simétrica, com a Presença do Efeito Corona, com Representação da Primeira Descarga com Pico Único

Comprimento do Vão (m)	Trecho	Primeira Descarga			Descarga Subseqüente			Taxa Total de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano por Trecho
		Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	
200	I	225,05	0,00%	0,00	100,85	0,00%	0,00	0,00
	II	199,28	0,79%	0,02	94,57	0,00%	0,00	0,02
	III	184,14	0,96%	0,03	90,93	0,00%	0,00	0,03
	IV	176,90	1,07%	0,03	88,30	0,00%	0,00	0,03
400	I	206,68	0,00%	0,00	104,81	0,00%	0,00	0,00
	II	181,90	0,99%	0,03	100,37	0,00%	0,00	0,03
	III	171,55	1,16%	0,03	99,40	0,00%	0,00	0,03
	IV	167,84	1,22%	0,03	99,36	0,00%	0,00	0,03
600	I	222,17	0,00%	0,00	121,43	0,00%	0,00	0,00
	II	203,23	0,00%	0,00	119,07	0,00%	0,00	0,00
	III	197,29	0,81%	0,02	119,13	0,00%	0,00	0,02
	IV	195,76	0,82%	0,02	118,72	0,00%	0,00	0,02
800	I	248,21	0,00%	0,00	147,34	0,00%	0,00	0,00
	II	238,38	0,00%	0,00	146,10	0,00%	0,00	0,00
	III	236,55	0,00%	0,00	148,36	0,00%	0,00	0,00
	IV	235,91	0,00%	0,00	147,77	0,00%	0,00	0,00
1000	I	273,94	0,00%	0,00	183,77	0,00%	0,00	0,00
	II	260,49	0,00%	0,00	183,80	0,00%	0,00	0,00
	III	255,64	0,00%	0,00	183,39	0,00%	0,00	0,00
	IV	254,07	0,00%	0,00	182,02	0,00%	0,00	0,00

Tabela 4.31 – Resultado Total da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Convencional, considerando a Descarga Simétrica, com a Presença do Efeito Corona, por 100 km por Ano

Comprimento do Vão (m)	Primeiras Descargas (Pico Duplo) e Descargas Subseqüentes	Primeiras Descargas (Pico Único) e Descargas Subseqüentes
200	0,00	0,09
400	0,00	0,09
600	0,00	0,04
800	0,00	0,00
1000	0,00	0,00

Tabela 4.32 - Cálculo da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Compacta, considerando a Descarga Simétrica, com a Presença do Efeito Corona, com Representação da Primeira Descarga com Pico Duplo

Comprimento do Vão (m)	Trecho	Primeira Descarga			Descarga Subseqüente			Taxa Total de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano
		Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	
200	I	192,91	0,85%	0,02	77,31	0,00%	0,00	0,02
	II	172,25	1,14%	0,03	72,46	0,00%	0,00	0,03
	III	160,40	1,37%	0,04	69,62	0,00%	0,00	0,04
	IV	154,77	1,51%	0,04	67,52	0,00%	0,00	0,04
400	I	178,49	1,04%	0,03	78,16	0,00%	0,00	0,03
	II	157,82	1,43%	0,03	73,45	0,00%	0,00	0,03
	III	151,05	1,60%	0,04	72,43	0,00%	0,00	0,04
	IV	149,17	1,65%	0,04	72,30	0,00%	0,00	0,04
600	I	208,90	0,00%	0,00	99,04	0,00%	0,00	0,00
	II	193,47	0,85%	0,02	95,46	0,00%	0,00	0,02
	III	188,93	0,90%	0,02	95,37	0,00%	0,00	0,02
	IV	187,50	0,92%	0,03	95,21	0,00%	0,00	0,03
800	I	240,71	0,00%	0,00	121,73	0,00%	0,00	0,00
	II	230,73	0,00%	0,00	120,13	0,00%	0,00	0,00
	III	228,11	0,00%	0,00	119,85	0,00%	0,00	0,00
	IV	227,04	0,00%	0,00	119,54	0,00%	0,00	0,00
1000	I	257,26	0,00%	0,00	145,48	0,00%	0,00	0,00
	II	240,60	0,00%	0,00	144,95	0,00%	0,00	0,00
	III	233,24	0,00%	0,00	144,95	0,00%	0,00	0,00
	IV	230,17	0,00%	0,00	144,84	0,00%	0,00	0,00

Tabela 4.33 – Cálculo da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Compacta, considerando a Descarga Simétrica, com a Presença do Efeito Corona, com Representação da Primeira Descarga com Pico Único

Comprimento do Vão (m)	Trecho	Primeira Descarga			Descarga Subseqüente			Taxa Total de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano por Trecho
		Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	Corrente Crítica Média (kA)	Probabilidade Acumulada (%)	Taxa de Ruptura a Meio de Vão por 100 km por ano	
200	I	174,46	1,11%	0,03	77,31	0,00%	0,00	0,03
	II	153,79	1,53%	0,04	72,46	0,00%	0,00	0,04
	III	141,70	1,89%	0,06	69,62	0,00%	0,00	0,06
	IV	135,95	2,10%	0,06	67,52	0,00%	0,00	0,06
400	I	157,01	1,45%	0,03	78,16	0,00%	0,00	0,03
	II	135,98	2,10%	0,05	73,45	0,00%	0,00	0,05
	III	127,32	2,48%	0,06	72,43	0,00%	0,00	0,06
	IV	124,24	2,64%	0,06	72,30	0,00%	0,00	0,06
600	I	180,00	1,02%	0,03	99,04	0,00%	0,00	0,03
	II	161,23	1,36%	0,04	95,46	0,00%	0,00	0,04
	III	154,98	1,50%	0,04	95,37	0,00%	0,00	0,04
	IV	153,76	1,53%	0,04	95,21	0,00%	0,00	0,04
800	I	207,51	0,00%	0,00	121,73	0,00%	0,00	0,00
	II	197,35	0,81%	0,03	120,13	0,00%	0,00	0,03
	III	195,47	0,83%	0,03	119,85	0,00%	0,00	0,03
	IV	195,04	0,83%	0,03	119,54	0,00%	0,00	0,03
1000	I	222,88	0,00%	0,00	145,48	0,00%	0,00	0,00
	II	209,30	0,00%	0,00	144,95	0,00%	0,00	0,00
	III	205,38	0,00%	0,00	144,95	0,00%	0,00	0,00
	IV	204,16	0,00%	0,00	144,84	0,00%	0,00	0,00

Tabela 4.34 – Resultado Total da Taxa de Ruptura a Meio de Vão para a Torre Compacta, considerando a Descarga Simétrica, com a Presença do Efeito Corona, por 100 km por Ano

Comprimento do Vão (m)	Primeiras Descargas (Pico Duplo) e Descargas Subseqüentes	Primeiras Descargas (Pico Único) e Descargas Subseqüentes
200	0,14	0,19
400	0,14	0,21
600	0,07	0,15
800	0,00	0,09
1000	0,00	0,00

É importante destacar que quando o efeito corona é considerado no cálculo da taxa de ruptura a meio de vão, não se verifica qualquer contribuição de descargas subseqüentes, que apresentam valores de corrente crítica muito elevados.

Os resultados obtidos a partir da consideração do efeito corona mostram uma grande redução da taxa de ruptura a meio de vão. Tal constatação indica que o efeito corona é importante quando se deseja uma precisão razoável nos resultados e sua desconsideração deve ser realizada apenas quando se deseja encontrar resultados bastante conservativos.

Apesar da forte redução na taxa de ruptura a meio de vão, causada pela consideração do efeito corona, deve-se destacar que tal efeito não resultou em taxas desprezíveis para o desempenho de linhas de 500 kV, e os resultados para cada torre são tratados detalhadamente no item 4.5.5.

---

**4.5.5 Síntese das Análises e Resultados e Considerações a Respeito do Desempenho das Geometrias de Torre Consideradas**

A tabela 4.35 concentra os resultados obtidos neste capítulo e permite sintetizar algumas análises já realizadas nos tópicos anteriores.

Tabela 4,35 – Síntese dos Resultados de Taxa de Ruptura a meio de Vão por 100 km por ano para as Torres Convencional e Compacta

Configuração de Torre	Comprimento do Vão (m)	Taxa de ruptura (número de rupturas por 100km por ano)							
		Primeiras Descargas Representadas com Pico Duplo				Primeiras Descargas Representadas com Pico Único			
		Descarga Assimétrica		Descarga Simétrica		Descarga Assimétrica		Descarga Simétrica	
		sem corona	com corona	sem corona	com corona	sem corona	com corona	sem corona	com corona
Convencional	200	1,56	0,27	0,18	0,00	1,74	0,34	0,24	0,09
	400	1,90	0,32	0,19	0,00	2,31	0,46	0,28	0,09
	600	1,18	0,26	0,16	0,00	1,74	0,41	0,25	0,04
	800	0,96	0,21	0,10	0,00	1,48	0,32	0,19	0,00
	1000	1,01	0,21	0,07	0,00	1,44	0,30	0,19	0,00
Compacta	200	3,02	0,54	0,46	0,14	3,20	0,68	0,59	0,19
	400	3,20	0,57	0,48	0,14	3,69	0,82	0,69	0,21
	600	2,76	0,48	0,42	0,07	3,48	0,75	0,66	0,15
	800	1,34	0,33	0,32	0,00	2,06	0,50	0,49	0,09
	1000	1,12	0,30	0,35	0,00	1,62	0,42	0,50	0,00

Os resultados de taxa de ruptura a meio de vão para a configuração de torre compacta, a menos quando a mesma é nula, são superiores aos valores encontrados para a configuração de torre convencional. Tais resultados se devem, principalmente, aos valores reduzidos de suportabilidade a meio de vão da configuração compacta em relação à configuração convencional, para toda a faixa de comprimentos de vão em análise.

Valores consideráveis de taxa de ruptura a meio de vão se concentraram na faixa de comprimentos de vão entre 200 m e 600 m, que representa a faixa de comprimentos de

vãos típica em linhas de 500 kV, o que evidencia a importância do fenômeno de ruptura a meio de vão no desempenho destas linhas.

Destaca-se também a diferença de resultados em relação à representação da primeira descarga por pico duplo ou pico único. A representação de primeira descarga por pico único resultou em maiores valores de taxa de ruptura a meio de vão em relação a representação por pico duplo. No entanto, a representação por pico duplo é mais realista em relação ao que se observa nas medições de primeiras descargas reais a partir de torres instrumentadas.

A consideração de injeção de descarga simétrica ou assimétrica mostrou ter grande influência nos resultados. As descargas simétricas reduzem consideravelmente a taxa de ruptura a meio de vão em relação à injeção de descarga assimétrica. As taxas de ruptura a meio de vão, obtidas para injeção de descarga simétrica, também correspondem aos resultados esperados em caso de haver a ruptura do isolamento entre os cabos pára-raios antes que ocorra uma disrupção entre o cabo pára-raios e a fase mais próxima devido a uma descarga assimétrica.

Outro fenômeno que se mostrou relevante foi a consideração do efeito corona, que também resulta em uma redução significativa na taxa de ruptura a meio de vão. No entanto, o modelo considerado tem algumas limitações que podem levar a resultados pouco precisos, uma vez que não leva em conta a dinâmica do processo de formação do envelope de corona em função da variação da sobretensão aplicada ao condutor ou ao feixe de sub-condutores.

Através dos resultados apresentados neste trabalho, pode-se elaborar uma estimativa de desempenho das linhas compostas por configurações das torres analisadas. No entanto, há certa complexidade para se constatar se, ocorrida uma ruptura a meio de vão, haverá o desligamento ou não da linha.

Para que haja um desligamento, o arco elétrico formado através da ruptura do isolamento

---

de ar precisa ser sustentado pela tensão de operação da linha, provocando um curto-circuito e a respectiva atuação da proteção nas extremidades da mesma. Não há na literatura trabalhos que abordem o comportamento deste arco a meio de vão, entre cabos condutores, bem como a sua probabilidade de extinção. Em se tratando de descargas incidentes nas fases ou nas torres, em caso de ocorrência de ruptura do isolamento próximo a uma cadeia de isoladores, estima-se que 85% dos mesmos possam levar a linha a um desligamento (DARVENIZA, 1997). No entanto, acredita-se que tal percentual pode ser reduzido para o espaçamento no meio do vão, devido a sua configuração. No entanto, para fins conservativos, é recomendável que se considere que todas as rupturas de isolamento levem ao desligamento da linha (IEEE, 1997a).

Diante disso, em uma primeira aproximação, o desempenho das configurações de linha até aqui analisadas são discutidas, ainda que levem a considerações de caráter conservativo, estando abertas as questões aqui levantadas para investigações futuras.

Os resultados aqui discutidos partem da premissa de que não ocorrem incidências de descargas simétricas, cuja ocorrência é de difícil previsão, considera-se influência do efeito corona, e a densidade de descargas igual a 1 por km<sup>2</sup> por ano.

#### ***4.5.5.1 Torre Convencional***

Através da figura 4.13, observa-se que é pouco provável, dentro da faixa de comprimentos de vãos analisados, que haja uma ruptura entre os cabos pára-raios antes que haja uma ruptura a meio de vão. Com isso os resultados de taxa de ruptura a meio de vão relativo a descargas simétricas mostram-se, nesse sentido, pouco prováveis, o que não descarta, como já mencionado, que ocorram descargas simétricas para esta configuração de torre.

Para comprimentos de vão entre 200 m e 800 m, sem se considerar o efeito corona, a taxa de ruptura a meio de vão se encontra entre 0,96 e 1,9 para representação de primeira descarga com pico duplo e entre 1,48 e 2,31 para representação de primeira descarga com pico único. Considerando-se o efeito corona, a taxa cai para uma faixa entre 0,21 e 0,32 para representação de primeira descarga com pico duplo e entre 0,32 e 0,46 para representação

---

de primeira descarga com pico único. A consideração dos resultados com a primeira descarga representa com um único pico são mais conservativos e, por razões já expostas, a representação da primeira descarga com pico duplo é mais real.

Para vãos maiores, entre 800 m e 1000 m, sem se considerar o efeito corona, tem-se uma taxa de desligamentos entre 0,96 e 1,01 desligamentos por 100 km por ano para representação de descarga com pico duplo e entre 1,44 e 1,48 para representação de primeira descarga com pico único. Considerando-se o efeito corona, obtém-se taxas de 0,21 desligamentos por 100 km por ano para representação de primeiras descargas com pico duplo e entre 0,30 e 0,32 desligamentos por 100 km por ano para primeiras descargas com pico único. No entanto, vãos desses comprimentos geralmente são dotados de cabos com flechas reduzidas e de torres especiais, diferentes daquelas analisadas nesta dissertação, com alturas mais elevadas e maiores espaçamentos entre as fases, geralmente relacionadas a grandes travessias (KIESSLING, 2008). Seria, portanto, necessário uma análise especial para o tipo de travessia em questão e da respectiva estrutura utilizada.

#### ***4.5.5.2 Torre Compacta***

Já a torre compacta apresenta grande probabilidade de que ocorra uma descarga entre os cabos pára-raios antes que ocorra a ruptura a meio de vão para comprimentos de vão acima de 400 m, como já mostrado na figura 4.14. Neste caso, os resultados obtidos para descargas simétricas são válidos para vãos entre 400 m e 1000 m. Entre 200 m e 400 m, consideram-se os resultados obtidos para descargas assimétricas.

Partindo das premissas já expostas, sem se considerar o efeito corona, entre 200 m e 400 m de comprimento de vão, tem-se uma taxa de 3,02 a 3,2 desligamentos por 100 km por ano para representação de primeira descarga por pico duplo e entre 3,2 e 3,69 desligamentos por 100 km por ano para representação de descarga por pico único. Considerando-se o efeito corona, vãos entre 200 m e 400 m apresentam taxas entre 0,54 e 0,57 desligamentos por 100 km por ano para representação de primeira descarga com pico duplo e entre 0,68 e 0,82 desligamentos por 100 km por ano para primeiras descargas com pico único.

---



Para comprimentos de vão entre 400 m e 800m , sem considerar o efeito corona, as taxas de desligamento encontradas estão entre 0,32 e 0,48 desligamentos por 100 km por ano para representação de primeira descarga com pico duplo e entre 0,49 e 0,69 para representação de primeira descarga com pico único. Considerando-se o efeito corona, têm-se taxas entre zero e 0,14 desligamentos por 100 km por ano, para primeira descarga representada com pico duplo, e entre 0,09 e 0,21 desligamentos por 100 km por ano, com a representação da primeira descarga com pico único.

Para vãos entre 800 m e 1000 m, sem se considerar o efeito corona, a taxa de desligamento está entre 0,32 e 0,35 desligamentos por 100 km por ano para representação de primeira descarga com pico duplo e entre 0,49 e 0,50 desligamentos por 100 km por ano para representação de primeira descarga com pico único. Considerando-se o efeito corona, tem-se um índice igual a zero desligamento por 100 km por ano para representação de primeiras descargas com pico duplo e entre zero e 0,09 para primeiras descargas representadas com pico único. Como dito anteriormente, estes comprimentos de vão estão relacionados a grandes travessias e torres especiais, portanto estes resultados podem ter pouco significado.

#### ***4.5.5.3 Comparação de Desempenho entre a Torre Convencional e a Torre Compacta***

A configuração de torre compacta mostrou-se mais susceptível a sofrer ruptura a meio de vão para os dois tipos de incidência, simétricas e assimétricas, quando comparada diretamente com a configuração em torre convencional.

No entanto, sob a perspectiva de ocorrência de ruptura entre os cabos pára-raios, para comprimentos de vão acima de 400 m em torres compactas, é esperado que ocorra ruptura entre estes cabos antes que possa haver uma ruptura a meio de vão, o que implica em uma taxa similar àquela decorrente de descarga simétrica para tais vãos. Conseqüentemente, a torre compacta passa a ter um melhor desempenho em relação à torre convencional para vãos acima de 400 m, já que não é esperada uma ruptura entre os cabos pára-raios antes de uma ruptura a meio de vão para esse tipo de torre.

---

---

Sob outro ponto de vista, não se pode desprezar a possibilidade de ocorrência de descarga simétrica para as duas configurações de torre, o que torna difícil uma avaliação precisa de qual torre apresenta melhor desempenho.

Os resultados obtidos para ambas as torres sugerem que a ruptura a meio de vão pode exercer grande influência no desempenho de linhas de transmissão de 500 kV. Como o Brasil apresenta em sua maior parte densidades de acima de 1 descarga por km<sup>2</sup> por ano e sabendo-se que as linhas apresentam de 0,5 a 2 desligamentos por 100 km por ano, pode-se deduzir que a ruptura a meio de vão é responsável por grande parte dos desligamentos, ao contrário do que a literatura tradicional sugere, sempre considerando o *backflashover* na torre como a grande causa das falhas por descargas atmosféricas.

---

# 5 Conclusões e Propostas de Continuidade

## 5.1 *Introdução*

Este trabalho teve como objetivo a investigação da influência da falha de blindagem e da ruptura a meio de vão no desempenho de linhas de transmissão de nível tensão de operação superior a 230 kV frente a descargas atmosféricas.

A fim de se discutir a influência da falha de blindagem, a descrição elementar do fenômeno foi apresentada, seguida dos conceitos básicos quanto à metodologia tradicional de modelo eletrogeométrico que se utiliza para fins de cálculo da taxa de falha de blindagem. Posteriormente, baseado em trabalhos recentes dedicados ao tema, pôde-se detalhar e discutir os principais desafios atuais no cômputo da taxa de falha.

Quanto à ruptura a meio de vão, a descrição do fenômeno foi detalhada e discutida, bem como os principais parâmetros que podem influenciar o desempenho da linha frente a descargas a meio de vão. Através do ATPDraw, modelou-se duas configurações típicas de linhas de transmissão de 500 kV, convencional e compacta, através de parâmetros distribuídos dependentes da frequência, bem como curvas de corrente de primeira descarga e descargas subseqüentes, a partir de soma de funções de Heidler. As primeiras descargas foram modeladas de modo a apresentar um único pico ou pico duplo. Com isso, foram simuladas incidências de descargas ao longo do vão, a fim de se calcular as

---

sobretensões resultantes e, conseqüentemente, estimar os valores de corrente crítica, de probabilidade acumulada e, com isso, estimar taxas de ruptura a meio de vão de cada configuração de linha, para comprimentos de vão entre 200 m e 1000 m.

Os tópicos seguintes detalham o conjunto das principais conclusões obtidas neste trabalho.

## ***5.2 Conclusões a Respeito da Influência da Falha de Blindagem***

Através das discussões e análise de trabalhos recentes relativos ao fenômeno de falha de blindagem bem como ao cálculo da taxa de falha em linhas de 500 kV e UAT, verificou-se que características peculiares destas linhas podem levar ao aumento do número de ocorrências nas mesmas, como os elevados níveis de tensão em que operam e as suas configurações geométricas, que envolvem torres elevadas, vãos muito longos e grandes distâncias entre as fases e os cabos pára-raios.

Os dados de incidências de descargas nas fases obtidos por Takami em (TAKAMI, 2007a) motivam alguns trabalhos na busca de um melhor entendimento do fenômeno de falha de blindagem em linhas com estes níveis de tensão de operação. Os resultados sugerem a possibilidade de aprimoramento do modelo eletrogeométrico para um cômputo mais apurado da taxa de falha de blindagem, sendo necessária inclusive a consideração do efeito da tensão de operação da linha.

Através dos resultados de ensaio realizados por Taniguchi e detalhados em (TANIGUCHI, 2008), observou-se o efeito dos ângulos de incidência do canal precursor de descarga e como a geometria da linha afeta o seu desempenho relativo a falhas de blindagem. No entanto, tal experimento mostrou ter algumas limitações, como a utilização de um modelo simplificado de linha, em escala reduzida e desconsiderando a influência da tensão de operação, que já se mostrou importante através das observações de Takami em (TAKAMI, 2007a). Portanto, é necessária a realização de novos testes, que provavelmente irão trazer resultados e conclusões diferentes das que foram apresentadas. De qualquer forma, pode-se concluir que os modelos eletrogeométricos tradicionais

---

podem necessitar de maior complexidade a fim de contemplar o perfil de incidências observado.

Apesar dos resultados discutidos neste trabalho indicarem a necessidade de reavaliação de conceitos e dos modelos eletrogeométricos tradicionais deve-se ressaltar a importância de se analisar cada caso especificamente. As observações de parâmetros e de características de incidências de primeiras descargas negativas que incidem nas fases realizadas por Takami em (TAKAMI, 2007a), bem como os testes realizados por Taniguchi (TANIGUCHI, 2008) foram realizados para configurações geométricas específicas. Portanto não é recomendável a princípio a adoção de novos critérios de estudo e projeto baseado em dados tão específicos, sendo necessário realizar novas análises em diferentes configurações de torre em diversas regiões, a fim de consolidar as constatações e se obter novos registros.

### ***5.3 Conclusões a Respeito da Ruptura a Meio de Vão***

Neste trabalho foi detalhado o fenômeno de ruptura a meio de vão, bem como os principais parâmetros que influenciam nas sobretensão resultante e no desempenho da linha.

Dada a escassez da literatura tradicional em relação ao tema, foi realizada uma avaliação de desempenho de linhas de transmissão típicas de 500 kV frente à ruptura a meio de vão. Foram utilizadas as estruturas de torre convencional e compacta, com comprimentos de vão variando entre 200 m e 1000 m. Para fins de representação da corrente de descarga, utilizaram-se formas de onda de primeiras descargas, com pico duplo e único, e subseqüentes, sintetizadas a partir da soma de funções de Heidler.

Foram obtidas formas de onda de sobretensão resultante de incidências de primeiras descargas e descargas subseqüentes no ponto central do vão e observou-se a característica oscilatória destas ondas. É ressaltada a necessidade de se avaliar a suportabilidade deste tipo de espaçamento entre o cabo pára-raios e o feixe de sub-condutores, levando-se em conta a característica da forma de onda de tensão real observada. A utilização de impulsos com forma de onda em dupla exponencial pode levar a resultados distintos e pouco

---

realistas.

As primeiras descargas, quando representadas por um único pico, resultaram em sobretensões mais elevadas que aquelas geradas pela representação de primeiras descargas com pico duplo, para picos máximos de valores iguais. No entanto, a representação por pico duplo mostra-se mais adequada para a representação da primeira descarga, pois se mostra mais realista em relação às formas de onda de corrente observadas em medições.

Quanto à representação da corrente de descarga subsequente, apesar da mesma resultar em maiores sobretensões por unidade de corrente em relação às primeiras descargas, as mesmas geram sobretensões em kV inferiores àquelas geradas por primeiras descargas, sendo estas as que determinam as taxas de ocorrência de ruptura a meio de vão.

O perfil de sobretensões máximas resultantes de injeção de corrente e os respectivos valores de corrente crítica ao longo do vão foram obtidos para cada comprimento de vão em análise, considerando-se descargas assimétricas e simétricas, primeiras e subsequentes, bem como a influência da representação do efeito corona. Observou-se que a influência das torres adjacentes reduz-se consideravelmente com o aumento do comprimento do vão. Esse efeito é ainda mais pronunciado quando se considera descargas subsequentes, que possuem um tempo de frente muito curto.

Constata-se que o fato de a descarga ser simétrica ou assimétrica, bem como a possibilidade de ocorrer uma ruptura entre os cabos pára-raios antes que haja ruptura entre o cabo pára-raios e a fase mais próxima, reduz consideravelmente as sobretensões, o que faz com que o valor da corrente crítica para um determinado ponto do vão aumente.

Uma considerável redução na sobretensão também é observada ao se representar o efeito corona nos cabos pára-raios e nas fases. No entanto, o modelo de corona empregado tem algumas limitações, pois considera apenas o cálculo de um raio efetivo fixo para o cabo pára-raios e para o feixe de sub-condutores em função das sobretensões e da altura média

---

dos mesmos, desprezando-se a dinâmica do crescimento da tensão e a conseqüente variação do raio dos condutores ao longo do tempo.

As taxas de desligamento calculadas neste trabalho para este mecanismo mostraram-se significativas para linhas de 500 kV apresentando vãos típicos entre 200 m e 600 m, mesmo com a consideração do efeito corona e da verificação de possibilidade de ruptura entre os cabos pára-raios.

Ao contrário do que é indicado na literatura tradicional, a ruptura a meio de vão pode ser significativa para o desempenho de linhas de EAT e UAT frente a descargas atmosféricas. Alguns parâmetros têm notadamente forte influência nos resultados, como o cômputo do efeito corona e da pré-descarga, bem como a característica da incidência (descarga simétrica ou assimétrica em relação aos cabos pára-raios).

Por outro lado, as análises de sensibilidade envolvidas assumiram um caráter simplificado e variações nas representações desses efeitos podem impactar fortemente nos resultados. Tais aspectos devem motivar as pesquisas para fins de continuidade de trabalho.

#### ***5.4 Propostas de Continuidade***

Uma idéia decorrente deste trabalho é o estudo do arco originado a partir da ruptura a meio de vão. Dada a característica particular do espaçamento entre os cabos a meio de vão, é necessária a avaliação da sustentação deste arco pela tensão de operação da linha bem como da probabilidade deste arco ser extinto. O autor não encontrou na literatura tradicional trabalhos que discutam tal probabilidade para este tipo de espaçamento específico.

Diante dos resultados apresentados e da evidente influência do efeito corona, o autor sugere que sejam desenvolvidos modelos mais apurados deste efeito, seguidos de uma análise de sensibilidade quanto ao efeito destas novas representações nas sobretensões resultantes e na taxa de ruptura a meio de vão.

---

Finalmente, é necessário o desenvolvimento de ferramentas computacionais que incorporem o cômputo das falhas de blindagem e da ruptura a meio de vão, segundo os resultados e constatações aqui apresentadas.

---



# 6 Referências Bibliográficas

ANDERSON R.B., ERICKSSON A.J., *"Lightning parameters for engineering application"*, *Electra*, vol. 69, pp. 65-102, -1980

ARMSTRONG, H. R., E.R. WHITEHEAD, *"Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding"*, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-87, pp. 270-281, 1968

BARROSO, L.C., *"Calculo Numérico"*, Ed Harper & Row, São Paulo, 1983

BROWN, G. W., WHITEHEAD, E. R., *"Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding"* - II, *IEEE Transactions on PAS*, Vol. 88, pp. 617 - 626, 1969

BROWN, G. W. *"Lightning Performance I - Shielding Failures Simplified"*, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS - 97, pp. 33 - 38, 1978

CHOWDURI, P., KOTAPALLI, A. K., *"Significant Parameters in Estimating the Striking Distance of Lightning Strokes to Overhead Lines"*, *IEEE Trans. On Power Delivery*, vol 4, no. 3, pp. 1970-1981, July 1989.

---

---

DARVENIZA, M., *“Lightning Protection of Sub-Transmission and Distribution Systems”*. In: Proceedings of the IV International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), pp. 263-300, São Paulo, Brazil, September, 1997.

DE CONTI, A.R., VISACRO S., *“Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms”*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 49, number 2, May, 2007

DELLERA, L. GARBAGNATI, E., *“Lightning Stroke Simulation by Means of Leader Progression Model. Part I: Description of Model and Evaluation of Exposure of Free-Standing Structures”*, IEEE Trans on Power Delivery, pp 2009-22, 1990a

DELLERA, L. GARBAGNATI, E., *“Lightning Stroke Simulation by Means of Leader Progression Model. Part II: Exposure and Shielding Failure Evaluation at Overhead Lines with Assessment of Application Graphs”*. IEEE Trans on Power Delivery, pp 2023-29, 1990b

DOMMEL, H. W., *“Electromagnetic Transients Program. Reference Manual”*, Bonneville Power Administration, Portland, 1986.

EPRI, *“Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above/Second Edition”* – General Electric Co. Pittsfield, Mass. USA-1982

ERIKSSON, A.J., *“The Lightning Ground Flash – An Engineering Study”*, PhD. Thesis, University Natal, Pretoria, South Africa, dec. 1979

ERIKSSON, A.J., *“An Improved Electrogeometric Model for Transmission Line Shielding Analysis”*, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. PWRD-2, N° 3, pp 871-886, Jul. 1987a

---

ERIKSSON, A.J., *"The Incidence of Lightning Strikes to Power Lines"*, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. PWRD-2, N° 3, pp 859-870, Jul. 1987b

FERNANDES, J. H. M., PINHEIRO, R. P., NASCIMENTO, O. F., TANNURI, J. G., MASUDA, M., *"Torres para Linhas Compactas do Segundo Circuito 500 kV da Interligação Norte-Nordeste no Sistema Eletronorte - 1a Parte - Estudos Elétricos"* - VIII SNPTEE, 1986

GOLDE, R.H., *"The Frequency of Occurrence and the Distribution of Lightning Flashes to Transmission Lines"*, AIEE Trans., vol. 64, pp. 902-910, 1945

HE, J., TU, Y., ZENG, R., LEE, J.B., CHANG, S.H., GUAN, Z., *"Numeral Analysis Model for Shielding Failure of Transmission Line under Lightning Stroke"*, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 20, pp.815-821, April 2005

HEIDLER, F., *"Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP - Berechnung"*, Proc. 18th Int. Conf. Light. Protec., Munich, Germany, pp. 63-66, September, 1985

IEEE WORKING GROUP ON ESTIMATING THE LIGHTNING PERFORMANCE OF TRANSMISSION LINES, *"IEEE Working Group Report - Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II - Updates to Analytical Models"*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8 n. 3, July 1993

IEEE, *"Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines"*, IEEE Standard IEEE 1410, 1997a.

IEEE, *"Guide for Improving Lightning Performance of Transmission Lines"*, IEEE Standard 1243, 1997b

---

---

KIESSLING, F., "*Long-Span Crossings - Location and Selection of Tower Sites*", International Workshop: Long-Span Crossings in Aerial Transmission Lines, Cigré-Brazil/CE B2 -Aerial Lines, presentation, Rio de Janeiro, Brazil, May 2008

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

MACANN, G.D., "*The Effect of Corona on Coupling Factors, Between Ground Wires and Phase Conductors*" - AIEE Vol. 62, 1947

MARTI, J.R., "*Accurate Modeling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations*", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-101, p. 147-157, Janeiro, 1982

NAYEL, M., JIE, Z., HE, J., Notas não Publicadas dos Pesquisadores da Tsinghua University, a Respeito da Influência da Tensão das Fases na Falha de Blindagem em Linhas de Transmissão, Julho, 2007

PRIKLER, L., HØIDALEN, H. K., "*ATPDraw version 3.5 for Windows 9x/NT/2000/XP - User's Manual*" Preliminary Release 1.0, August 2002.

RAKOV, V. A., "*Lightning Parameters Important for Lightning Protection*". In: Proceedings of the VI International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), pp. 393-412, São Paulo, Brazil, November, 2001.

RIZK, F. A. M., "*Modeling of Transmission Line Exposure to Direct Lightning Strokes*", IEEE Trans Power Delivery, vol. 5, pp. 1983-1997, Nov. 1990

SHIODA, T., "*Performance Evaluation of LPATS-T at TEPCO*", in Proc. 25th Int. Conf. Lightning Protection, Rhodes, Greece, 2000, vol. 1, pp. 170-175

---

---

SINGER, H., WEISS, P., "A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields", IEEE Trans on Power Apparatus and Systems 93 (2): 1660-1668, October, 1972

SOARES Jr, A, "Modelagem de Linhas de Transmissão para Avaliação de Desempenho frente a Descargas Atmosféricas" - Tese de Doutorado, Orientador: Visacro, S., LRC - PPGEE/UFMG, 2001

SOARES Jr, A., VISACRO, S., "Simplified Expressions for Tower Surge Impedance Based on Application of a Field-Circuit Modeling Approach", pp. 486-491, Proceedings of the 27th ICLP, Avignon, France, September 2002

SOARES Jr. A., SCHROEDER M. A. O., VISACRO S., "Transient voltages in transmission Lines caused by direct Lightning Currents", IEEE - Transactions on Power Delivery, vol. 20, n.2, pp.1447-1452, April, 2005

TAKAMI, J. OKABE, S., "Characteristics of Direct Lightning Strokes to Phase Conductors of UHV Transmission Lines", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, pp 537 - 546, Janeiro 2007a

TAKAMI, J. OKABE, S., "Observational Results of Lightning Current on Transmission Towers", IEEE Trans. Power Del., vol 22, no 1, pp 547 - 556, Janeiro 2007b

TANIGUCHI, S., OKABE, S. "A Contribution to the Investigation of the Shielding Effect of Transmission Line Conductors to Lightning Strikes", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, pp. 710-720, June 2008

TORRES, H., GALLEGO, L., SALGADO, M., et. al., 2001, "Variation of Ground Stroke Density with Latitude". In: Proceedings of the VI International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), pp. 8-11, São Paulo, Brazil, November, 2001

---

---

UDO, T., "Switching Surge and Impulse Sparkover Characteristics of Large Gap Spacings and Long Insulator Strings", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 84, pp. 304-309, April 1965

VAHIDI, B., YAHYAABADI, M., "Leader Progression Analysis Model for Shielding Failure Computation by Using the Charge Simulation Method", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, pp. 2201-2206, October, 2008.

VISACRO, S., "A Representative Curve for Lightning Current Waveshape of First Negative Stroke", Geophys. Res. Lett., vol. 31, L07112, 2004.

VISACRO S. "Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia", Ed. ArtLiber, São Paulo, 2005

VISACRO, S. "Direct Strokes to Transmission Lines: Considerations on the Mechanism of Overvoltage Formation and their Influence on the Lightning Performance of Lines", Journal of Lightning Research. , v.1, pp. 60-68, 2007

WAGNER, C. F., LLOYD, B. L., "Effects of Corona on Travelling Waves" - AIEE Transactions, pt. III (Power Apparatus and Systems), vol. 74, pp. 858 - 72, 1955

WAGNER, C. F., HILEMAN, A. R., "Effect of Predischage Currents Upon Line Performance" - AIEE Transactions pt. III (Power Apparatus and Systems), vol. 82, pp. 117-31, April, 1963

WAGNER, C.F., "Application of Predischage Currents of Parallel Electrode Gaps", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 83, September 1964

YOUNG, F.S, J.M. CLAYTON, A.R. HILEMAN, "Shielding of Transmission Lines", AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Paper No. 63-640, pp. 132-154, 1963

---

# **A Sistema de Aquisição de Dados de Incidências em Cabos Fase**

## ***A.1 Introdução***

Conforme é citado no Capítulo 2 desta dissertação, criou-se um sistema de observação no Japão para investigar as características das incidências em cabos fases de linhas de 500 kV e de UAT, bem como possibilitar a estimação dos parâmetros físicos de tais descargas.

As linhas observadas consistem em estruturas de circuito duplo com arranjo vertical e dois cabos pára-raios no topo. As tarefas principais do sistema foram observar e registrar os surtos decorrentes de incidências nas linhas que chegassem às subestações, gravar as incidências a partir de câmeras espalhadas em pontos estratégicos e encontrar o local de incidência da descarga, através de um sistema de localização.

Neste anexo é comentado o sistema de observação utilizado, bem como a metodologia empregada para que fosse possível estimar os parâmetros das descargas.

## ***A.2 Sistema de Observação***

Para se verificar as características dos surtos introduzidos nas subestações, oriundos de incidências nas linhas, as características de tensão e corrente foram medidas em cinco instalações do sistema. Surtos de tensão puderam ser obtidos a partir de divisores

---

capacitivos localizados na entrada da subestação e os respectivos surtos de corrente foram medidos através de transformadores de corrente acoplados a dissipadores de surto. A Figura A.1 apresenta o sistema utilizado para medição dos surtos e aquisição de dados.

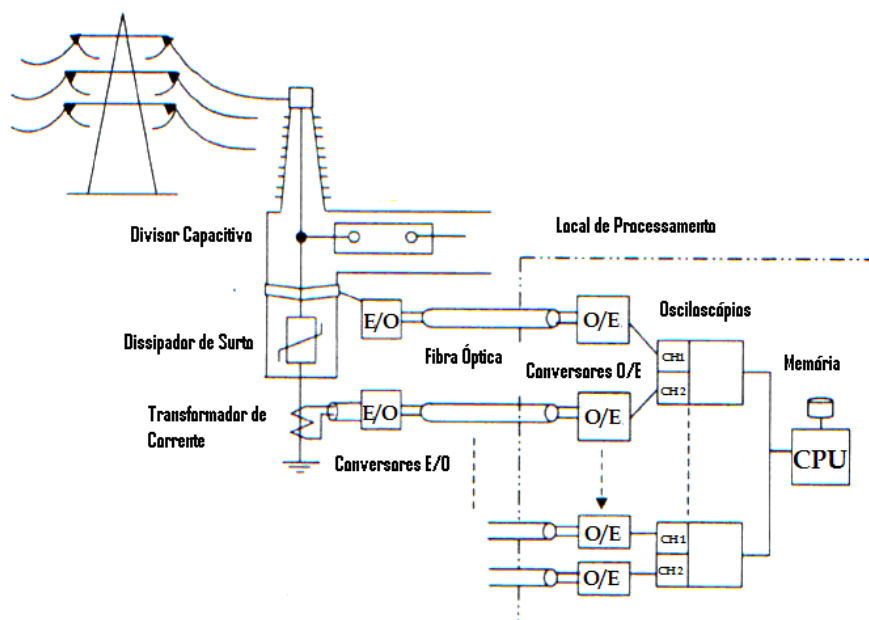


Figura A.1 – Sistema de Medição e Aquisição (adaptado de (TAKAMI, 2007a))

Os dados obtidos nos sistemas de medição foram convertidos em sinais ópticos e enviados a um local de processamento onde foram novamente convertidos em sinais elétricos. Um sistema de trigger, que atua com uma condição pré-definida, é capaz de acionar o sistema de gravação de dados, formado por osciloscópios digitais.

Uma vez acionados pelo comando de trigger, tais osciloscópios (CH1 e CH2 na figura A.1), sendo um de alta velocidade e outro de baixa velocidade, recolheram os dados enviados. Enquanto o osciloscópio de alta velocidade detalhava as características de forma de onda do surto, o osciloscópio de baixa velocidade identificava qual a fase da tensão à frequência industrial estava superposta ao surto.

Foram instaladas 48 câmeras que possibilitaram a observação da trajetória e as características das incidências. Essas câmeras foram distribuídas em diversos pontos do sistema. O sistema conhecido como LPATS (*Lightning Position and Tracking System*) foi utilizado para determinar o local de ocorrência de descarga e estimar a amplitude da



corrente da mesma através das ondas eletromagnéticas geradas pela descarga (SHIODA, 2000).

## ***A.2 Estimação dos Parâmetros de Descarga***

A alternativa de se medir os principais parâmetros da corrente de descarga diretamente nos cabos fase é bastante complexa. Entretanto é possível estimar tais parâmetros, com a utilização do sistema de localização de descargas (LPATS) e também de formas de onda obtidas nas subestações.

Os fenômenos são reproduzidos a partir da análise com um programa de Análise de Transitórios Eletromagnéticos. Nesta análise, tenta-se reproduzir as formas de onda obtidas nas subestações, simulando a corrente de descarga com forma de onda em rampa com duas seções retas e variando a amplitude da corrente, o tempo de frente e a duração do fenômeno.

Os parâmetros da forma de onda da corrente de descarga são ajustados a partir de dados obtidos do sistema de localização de descargas, que consistem em formas de onda do campo elétrico irradiado. Com isso, são executadas simulações até se reproduzir as mesmas formas de onda de tensão e corrente verificadas nas subestações.

---

# B Ensaio de Incidências em Modelos Reduzidos de UAT e 500 kV

## *B.1 Detalhes do Ensaio*

Conforme foi mostrado na Figura 2.15, a haste metálica foi posicionada de forma que a distância entre os condutores e a haste seja igual ao Raio de Atração dada pela equação B.1 (CHOWDURI, 1989), que relaciona o Raio de Atração  $r$ , em metros, com a amplitude de corrente de descarga  $I$ , em kA, respeitando-se a escala utilizada de 1:20:

$$r = \frac{6,72I^{0,8}}{20} \quad \text{Eq. B.1}$$

Foram escolhidas distâncias entre a haste e os condutores, para as correntes de 12 kA e 22 kA, o que representa distâncias de 2,5 e 4,0 m respectivamente, de acordo com a Equação B.1. Tais valores de corrente caracterizam incidências que podem ocorrer com alguma frequência por falha de blindagem, como foi verificado em (TAKAMI, 2007a).

Aplicaram-se impulsos de manobra de polaridade negativa a partir da haste, podendo haver descargas elétricas para os cabos fase e o cabo pára-raios. Foram variados os tempos de duração de frente de onda e de duração do impulso, bem como, amplitude e distância

---

entre a haste e os condutores.

As fases do circuito da linha (C1 a C3) foram representados por condutores simples de raio equivalente ao feixe de condutores da linha.

## B.2 Resultados Observados

Considerando-se que os cabos condutores C1, C2 e C3 são respectivamente as fases superior, intermediária e inferior, a seguir os testes que foram desenvolvidos e as respectivas conclusões são detalhados. A tabela B.1 apresenta o resumo dos resultados.

Tabela B.1- Lista dos Resultados de Ensaio (TANIGUCHI, 2008)

Arranjo da Haste em Relação aos Cabos	Caso 1				Caso 2				
	GW	C1	C2	C3	GW	C1	C2	C3	
Avaliação da Diferença de Configuração Geométrica entre Linhas de 500 kV e de Ultra Alta Tensão	Configuração de 500 kV				Configuração de Ultra Alta Tensão				
	Distância igual de C1 e C2 (d = 2,5 m)	0 0,00%	25 50,00%	21 42,00%	4 8,00%	0 0,00%	24 48,00%	26 52,00%	0 0,00%
	Distância igual de C1 e C3 (d = 2,5 m)	0 0,00%	5 10,00%	36 72,00%	9 18,00%	0 0,00%	2 4,00%	42 84,00%	6 12,00%
	Distância igual de C2 e GW (d = 4,0 m)	14 28,00%	20 40,00%	10 20,00%	6 12,00%	20 40,00%	21 42,00%	9 18,00%	0 0,00%
Avaliação da Diferença de Configuração dos Cabos na Torre e a Meio de Vão	Configuração dos Cabos na Torre				Configuração dos Cabos a Meio de Vão				
	Distância igual de C1 e GW (d = 2,5 m)	37 74,00%	0 0,00%	13 26,00%	0 0,00%	16 32,00%	14 28,00%	0 0,00%	0 0,00%
	Distância igual de C1 e C3 (d = 2,5 m)	7 14,00%	0 0,00%	34 68,00%	9 18,00%	0 0,00%	2 4,00%	42 84,00%	6 12,00%
Avaliação da Variação da Altura dos Cabos em Relação ao Solo	Altura Padrão				Altura padrão + 1,4 m				
	Distância igual de C1 e C3 (d = 4,0 m)	3 6,00%	10 20,00%	22 44,00%	15 30,00%	1 2,00%	10 20,00%	18 36,00%	6 12,00%
Avaliação do Efeito da Distância entre a Haste e os Cabos	d = 2,5m				d = 4,0m				
	Distância igual de C1 e C3 (d = 4,0m e 2,5m)	0 0,00%	2 4,00%	42 84,00%	6 12,00%	3 6,00%	10 20,00%	22 44,00%	15 30,00%

Resumidamente, pode-se concluir o seguinte:

- O gap menor sempre sofre mais descargas, ou seja, o cabo mais próximo da haste tende a sofrer um maior número de incidências;
- Descargas no cabo de menor diâmetro ocorrem com maior frequência se o mesmo se encontra a mesma distância da haste que outro cabo de maior diâmetro;

- Quanto mais próximos do solo se encontram a haste e o cabo, maior será a incidência neste cabo, uma vez que a formação do canal, devido ao efeito do solo, se dará na direção descendente.

### ***B.2.1 Avaliação das Incidências para Diferentes Configurações Geométricas entre Linhas***

Sabe-se que existe uma diferença de escala entre as dimensões de linhas de transmissão de 500 kV e linhas de transmissão de UAT. Para avaliar os efeitos de tais diferenças, estruturas típicas de tais linhas foram ensaiadas as configurações dos cabos no meio do vão para os dois projetos. Variou-se a posição da haste pela qual a tensão foi aplicada. A Figura B.1 mostra a diferença entre os arranjos ensaiados.

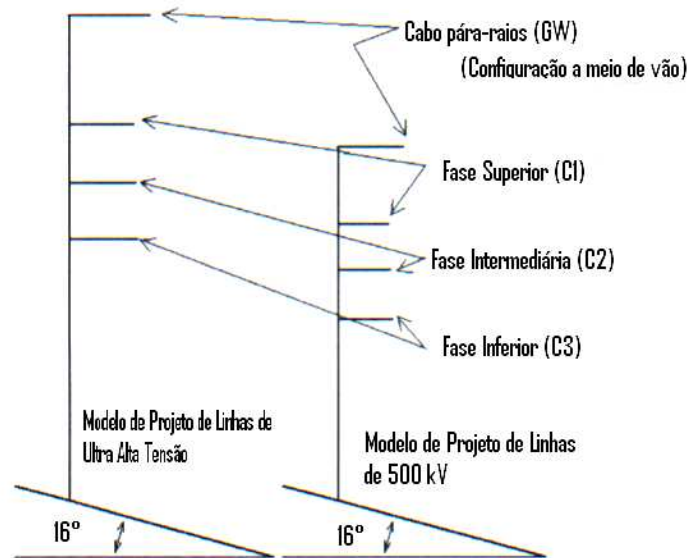


Figura B.1: Diferença nos Arranjos de Ensaios: Modelos de Projeto de Linhas de 500 kV e de Ultra-alta tensão a meio de vão (adaptado (TANIGUCHI, 2008))

Como pode ser observado, para ambos os testes com as duas configurações, houve sempre uma frequência de descarga maior entre a haste e os condutores mais próximos, o que se justifica pelo fato de que gaps menores entre a haste e os condutores tendem a sofrer um maior número de descargas.

Em linhas de 500 kV, devido às menores distâncias entre fases se comparado ao projeto de

linhas de Ultra-alta tensão, a frequência de descargas para os condutores mais próximos tende a ser menor, uma vez que a frequência de incidência nos cabos mais distantes aumenta.

Ainda para linhas de 500 kV, observa-se que o número de descargas para a fase inferior (C3) aumenta mais do que para linhas de Ultra-alta tensão. Este efeito se deve a maior proximidade da fase inferior e da haste em relação ao solo para linhas de 500 kV, o que faz com que a formação do canal tenda a ocorrer na direção descendente, ocasionando um maior número de descargas sobre a fase inferior.

### ***B.2.2 Avaliação da Diferença de Configuração dos Cabos na Torre e a Meio de Vão***

Nesse item é avaliado o efeito da diferença entre a configuração dos cabos na torre e a meio de vão, sabendo que as distâncias entre tais cabos são diferentes entre as duas configurações. No meio do vão, a distância entre o cabo pára-raios e o cabo fase é maior do que na torre. Com a configuração para linhas de Ultra-alta tensão, foi feita uma simulação para avaliar este efeito, tanto para a configuração de cabos na torre quanto no meio do vão. Tal variação pode ser vista na Figura B.2.

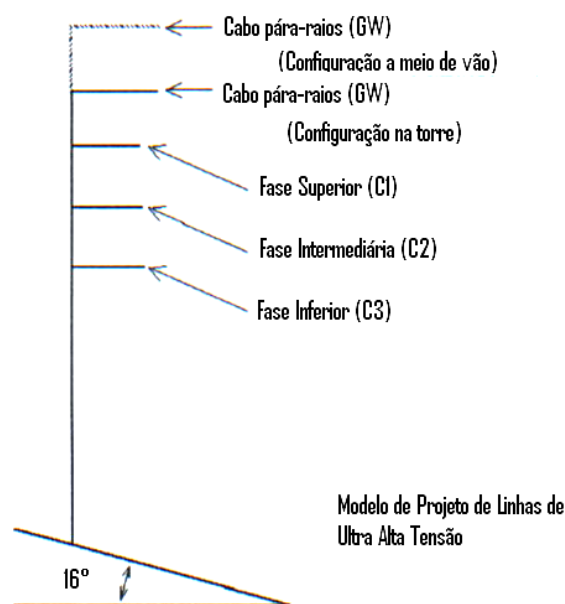


Figura B.2: Arranjos de Ensaio: Projeto de Linhas de Ultra-alta tensão para Cabos na Torre e a Meio de Vão (adaptado(TANIGUCHI, 2008))

Como pode ser observado na tabela B.1, o número de descargas no cabo pára-raios é maior do que na fase superior (C1) quando a distância entre a haste e tais cabos é a mesma. Isso pode ser explicado pelo fato de que o cabo pára-raios tem um diâmetro menor quando comparado ao cabo fase, o que resulta em um campo elétrico mais intenso no cabo mais fino e conseqüentemente em um maior número de descargas no mesmo.

A configuração dos cabos a meio de vão favorece um maior número de descargas na fase superior (C1), ao se comparar ao número de descargas em tal fase para a configuração na torre. Isso se explica pelo fato de que o cabo pára-raios se encontra a uma distância maior da fase superior a meio de vão do que na torre, reduzindo o efeito de blindagem.

### ***B.2.3 Avaliação da Variação da Altura dos Cabos em Relação ao Solo***

É fato que a altura das linhas de transmissão depende de diversos fatores como a topografia da região. De modo a verificar o efeito do distanciamento dos condutores em relação ao solo, foi feita uma simulação com a configuração dos cabos a meio de vão para linhas de Ultra-alta tensão. O esquema ensaiado pode ser visto na Figura B.3.

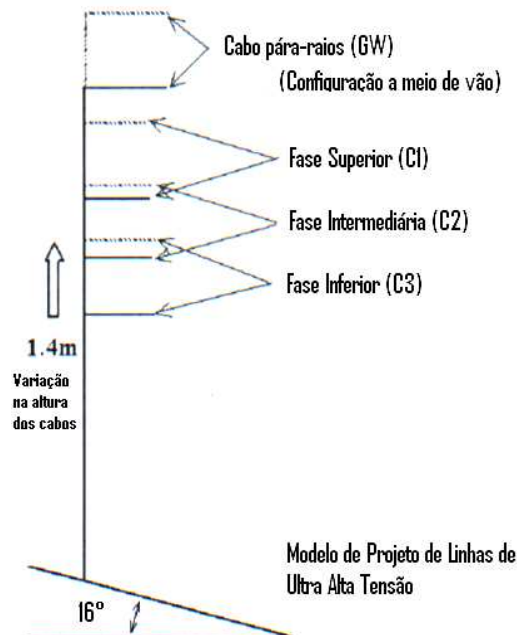


Figura B.3: Arranjos de Ensaio: Projeto de Linhas de Ultra-alta tensão para os Cabos a Meio de Vão, com a Variação da Altura dos Cabos em Relação ao Solo (adaptado (TANIGUCHI, 2008))

Por razões já citadas no item B.2.1, verifica-se um aumento no número de descargas na fase inferior (C3) quando este se encontra mais próximo do solo.

Para a configuração indicada, foi realizado um levantamento da direção final de formação do canal precursor de descarga. Para que tal levantamento fosse possível, foram pré-estabelecidas quatro áreas possíveis pelas qual o canal pode se desenvolver. A Figura B.4 ilustra tais áreas.

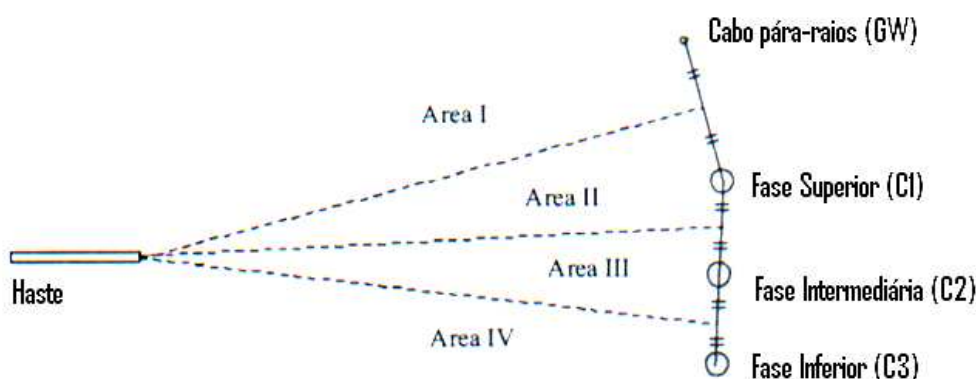


Figura B.4: Áreas Possíveis de Direção de Desenvolvimento do Canal (adaptado (TANIGUCHI, 2008))

Foi levantado o caminho percorrido pelo canal com a haste posicionada a uma distância de 4,0m dos cabos fase das fases superior e inferior (C1 e C3 respectivamente), para as hipóteses em que os cabos encontram-se mais próximos e posteriormente mais distantes em relação ao solo. A tabela B.2 detalha os resultados encontrados

Tabela B.2- Direção de Progressão do Canal (TANIGUCHI, 2008)

	Estrutura Ensaçada com os Cabos Mais Próximos do Solo				Estrutura Ensaçada com os Cabos Mais Distantes do Solo			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Incidência em GW	3 6,00%	0 0,00%	0 0,00%	0 0,00%	1 2,86%	0 0,00%	0 0,00%	0 0,00%
Incidência em C1	5 10,00%	1 2,00%	2 4,00%	0 0,00%	3 8,57%	5 14,29%	1 2,86%	1 2,86%
Incidência em C2	2 4,00%	4 8,00%	13 26,00%	5 10,00%	7 20,00%	3 8,57%	6 17,14%	2 5,71%
Incidência em C3	1 2,00%	0 0,00%	1 2,00%	13 26,00%	0 0,00%	1 2,86%	2 5,71%	3 8,57%
<b>Total por área</b>	11 22,00%	5 10,00%	16 32,00%	18 36,00%	11 31,43%	9 25,71%	9 25,71%	6 17,14%

Verificou-se que a tendência de formação final do canal na direção da área IV aumenta no

caso em que altura dos cabos em relação ao solo é menor, bem como ocorre um aumento de descargas nas duas fases mais baixas, principalmente na fase inferior (C3). Portanto fica clara a influência da proximidade do solo na direção final de formação do canal.

#### ***B.2.4 Avaliação do Efeito da Distância entre a Haste e os Cabos***

Sabe-se pelo Modelo Eletrogeométrico que o Raio de Atração depende da amplitude da corrente de descarga. De modo a verificar o efeito do Raio de Atração, variou-se a diferença de distâncias entre os cabos e a haste, posicionando-se esta a distâncias de 2,0m e 4,0m da fase superior (C1) e inferior (C3), ficando mais próxima da fase intermediária (C2) com a configuração dos cabos a meio de vão para uma linha de Ultra-alta tensão. A Figura B.5 ilustra a situação em questão.

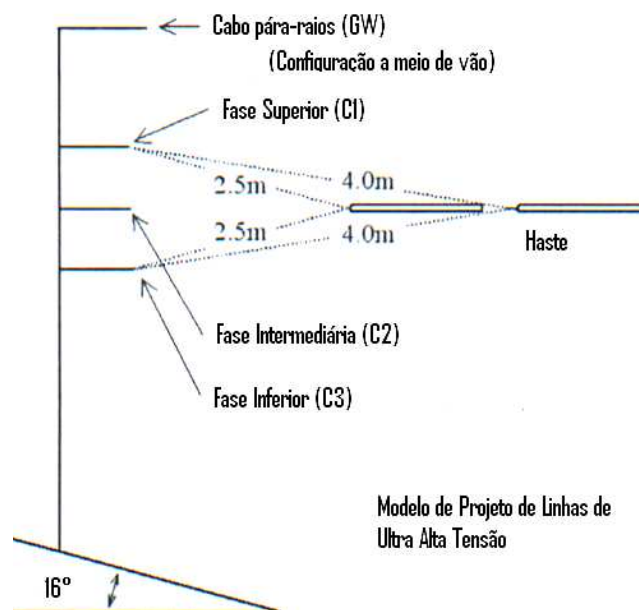


Figura B.5: Arranjos de Ensaio: Projeto de Linhas de Ultra-alta tensão para os Cabos a Meio de Vão, com a Variação da Distância entre a Haste e os Cabos (adaptado (TANIGUCHI, 2008))

Como em todos os ensaios anteriores, o cabo que sofre mais descargas é aquele mais próximo da haste. Entretanto, ao variar a distância da haste em relação à fase superior (C1) e inferior (C3) de 2,5m para 4,0m, a incidência no cabo mais próximo (C2) reduz significativamente, havendo uma maior dispersão de descargas para os outros cabos. É fato que a distribuição de descargas tende a ser mais distribuída entre os cabos à medida que se afasta a haste do cabo mais próximo.



### ***B.2.5 Avaliação do Ponto de Incidência para Aproximação do Canal Precursor em Diversas Direções***

Foi feita uma análise da influência de inclinação da haste, de modo a avaliar os pontos de incidência possíveis em função da direção de aproximação do canal precursor de descarga.

A haste foi posicionada mesma altura do cabo pára-raios, a uma distância de 4 metros do mesmo. Conforme a Figura B.6, a haste foi posicionada em ângulos de 0°, 45° e 90°.

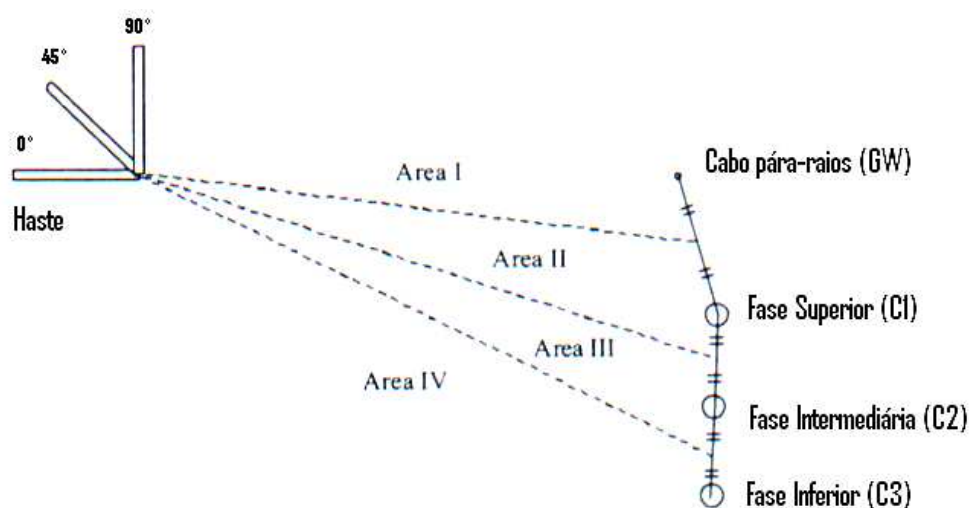


Figura B.6: Áreas Possíveis de Direção de Desenvolvimento do Canal: Haste á Altura do Cabo Pára-Raios e Variação de Inclinação da Mesma (adaptado (TANIGUCHI, 2008))

Verifica-se que grande parte das descargas atinge o cabo pára-raios, sendo o pior caso a inclinação de 45° na quais 10% das descargas atingem cabos fase. Percebe-se que uma inclinação de 0° favorece a formação do canal através da área I, e ao aumentar a inclinação da haste, tem-se uma maior formação de canal através da área IV. A Tabela B.3 resume os resultados obtidos.

Tabela B.3- Influência da Inclinação da Haste (TANIGUCHI, 2008)

	0°				45°				90°			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Incidência em GW	27	11	7	4	13	3	7	20	6	2	6	19
	54,00%	22,00%	14,00%	8,00%	27,08%	6,25%	14,58%	41,67%	18,18%	6,06%	18,18%	57,58%
Incidência em C1	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	0	0
	0,00%	0,00%	0,00%	2,00%	0,00%	0,00%	0,00%	6,25%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Incidência em C2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	2,08%	0,00%	2,08%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Incidência em C3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
<b>Total por área</b>	27	11	7	5	13	4	7	24	6	2	6	19
	54,00%	22,00%	14,00%	10,00%	27,08%	8,33%	14,58%	50,00%	18,18%	6,06%	18,18%	57,58%