

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A  
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: INFLUÊNCIA DO EFEITO CORONA  
NA RUPTURA A MEIO DE VÃO**

**LEANDRO VELOSO CUNHA**

**LEANDRO VELOSO CUNHA**

**DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A  
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: INFLUÊNCIA DO EFEITO CORONA  
NA 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  
JULHO – 2010**

---

## AGRADECIMENTOS

É chegado o momento de concluir mais uma etapa na jornada da vida. Em tempos como este é comum pararmos para refletir sobre o sentido das nossas conquistas e planejar novos rumos. Posso dizer que, após o tempo em que elaborei esta Dissertação de Mestrado, sou hoje uma pessoa mais madura tanto pessoalmente como profissionalmente. Neste tempo aprendi muito, desenvolvi um pouco mais minha visão crítica e minhas competências técnicas. Sinto-me também mais humano, por ter compartilhado esse tempo com grandes colegas, amigos e com minha família e sempre ter sido apoiado. Por tudo isso, faço um agradecimento especial a Deus.

Agradeço ao meu orientador, Professor Silvério Visacro, pelo aprendizado, por toda atenção, conselhos e por sempre me motivar durante toda a realização deste trabalho, e mesmo antes dele.

Aos pesquisadores do LRC (*Lightning Research Center*) e pessoas que já passaram por aquele centro de excelência em pesquisa em Descargas Atmosféricas e Proteção do Sistema Elétrico, pela prestatividade e por me apoiarem no desenvolvimento deste trabalho, em especial aos doutores: Profa. Maria Helena, Alberto, Amilton, Fernando, Cláudia e Rosilene.

A CEMIG pelo incentivo e aos colegas de trabalho pelo compartilhamento de informações e auxílio no levantamento de dados aqui utilizados.

A minha família, em especial a minha mãe Helenice, exemplo de força e de que é preciso enfrentar os desafios que a vida nos apresenta. Obrigado por me incentivar e sempre acreditar em mim.

Não poderia esquecer-me dos meus amigos. Obrigado a todos que me encorajaram. Palavras são pouco para expressar minha gratidão. Meus sinceros agradecimentos.

---

Dedico este trabalho aos meus pais  
Aluísio Carlos da Cunha (*in memoriam*) e  
Helenice Veloso Cunha

---

---

## RESUMO

No atual cenário do Setor Elétrico Brasileiro, a indisponibilidade de linhas de transmissão por falhas transitórias é altamente indesejável, pois pode levar à incidência de multas e cobranças para as empresas do setor de transmissão de energia e prejuízos para clientes. Nesse contexto, é importante que se tenha ferramentas e metodologias adequadas para se estimar o desempenho de equipamentos e linhas de transmissão.

Este trabalho enfoca os estudos de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas que, em geral, é influenciado por diversos aspectos ambientais (densidade de descargas atmosféricas no percurso da linha, relevo, características do solo), de projeto da linha (altura e tipo da torre, distância dos cabos, características do aterramento, etc.), e por características específicas do fenômeno causador dos desligamentos.

No trabalho, além do estudo dos parâmetros de influência normalmente considerados na literatura, são abordados alguns fenômenos que influenciam no desempenho de linhas de transmissão de extra-alta tensão que normalmente são desconsiderados em aplicativos e metodologias de avaliação de desempenho convencionais.

É apresentado o caso do desempenho de uma linha real de 500kV, incluindo o estudo das características da linha e evolução do histórico de ocorrências. O desempenho desta linha é simulado através de um *software* convencional de mercado, para determinar sua aplicabilidade para estudos em linhas de extra-alta tensão, suas vantagens e necessidades complementares em relação aos fenômenos efeito corona, correntes de pré-ruptura e sua influência na probabilidade de ocorrência de desligamento por ruptura a meio de vão.

Por fim é desenvolvida uma avaliação sobre os fenômenos Efeito Corona e Correntes de Pré-ruptura. Em relação ao Efeito Corona realiza-se uma abordagem da sua importância, evolução das técnicas de modelagem e testes dos modelos para verificação da adequabilidade para simulação computacional. Por meio de simulações de desempenho, avalia-se no caso real da linha apresentada a probabilidade de ocorrência de ruptura a meio de vão, considerando o Efeito Corona. Uma abordagem de natureza qualitativa é aplicada no caso das Correntes de Pré-ruptura.

---

## ABSTRACT

In the present scenario of the Brazilian Electric Sector, the unavailability of transmission lines due to transient faults is highly undesirable because it may lead to the incidence of fines and charges for power transmission utilities and damage to customers. In this context it is important to have appropriate tools and methodologies to estimate the performance of equipment and transmission lines.

This work focuses on lightning performance studies of transmission lines that, in general, is influenced by several environmental aspects (lightning density along the line route, topography, soil characteristics), parameters of the line design tower height and type, cable distances, ground characteristics, etc.), and specific features of the lightning event responsible for the occurrence.

In addition to the consideration of the traditional influent parameters indicated in the technical literature, this work takes into account some specific phenomena that influence the performance of extra-high voltage transmission lines and that are usually ignored in conventional software and methodologies, notably the midspan flashover in the presence of Corona Effect and of Pre-breakdown currents.

A case of performance of a real 500kV line is presented, including the study of the characteristics of the line and evolution of performance history. The performance of this line is simulated by a conventional commercial software to determine its applicability for studies on extra-high voltage lines, its advantages and complementary needs in relation to Corona phenomena, Pre-breakdown Currents and their influence on probability of midspan-flashover occurrences .

Finally the Corona phenomena and pre-breakdown currents are considered as influent parameter in midspan flashovers. Regarding the corona effect, the work considers its relevance, development of techniques for modeling and testing of models for simulation. The probability of midspan flashovers considering the corona effect is evaluated by means of simulation for the real 550-kV transmission line. The effect of the pre-breakdown currents is considered by means of a qualitative approach.

---

---

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1 RELEVÂNCIA DA INVESTIGAÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.2 OBJETIVO</b>	<b>2</b>
<b>1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO</b>	<b>3</b>
<b>2. AS FONTES DE DESLIGAMENTOS NÃO-PROGRAMADOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 230-A 500KV</b>	<b>4</b>
<b>2.1 INTRODUÇÃO</b>	<b>4</b>
<b>2.2 GERAL</b>	<b>5</b>
2.2.1 QUEIMADAS	5
2.2.2 VEGETAÇÃO	6
2.2.3 PERDA DE ISOLAMENTO	6
2.2.4 FALHAS DE NATUREZA MECÂNICA	6
2.2.5 CAUSAS EXTERNAS	7
<b>2.3 DESLIGAMENTOS DEVIDO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS</b>	<b>7</b>
2.3.1 INCIDÊNCIA INDIRETA	7
2.3.2 INCIDENCIA DIRETA	8
<b>3. PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA NOS DESLIGAMENTOS CAUSADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO</b>	<b>13</b>
<b>3.1 INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>3.2 PARÂMETROS AMBIENTAIS</b>	<b>13</b>
3.2.1 VARIAÇÃO DE RELEVO	13
3.2.2 CARACTERÍSTICAS DE SOLO	14
3.2.3 FATORES CLIMATOLÓGICOS	15
<b>3.3 PARÂMETROS DA LINHA DE TRANSMISSÃO</b>	<b>16</b>
3.3.1 BLINDAGEM	16
3.3.2 CARACTERÍSTICAS DE ISOLAMENTO	17
3.3.3 CARACTERÍSTICAS DA TORRE E DOS CABOS	18
3.3.4 IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO	21
<b>3.4 PARÂMETROS RELACIONADOS À DESCARGA ATMOSFÉRICA</b>	<b>22</b>

---

---

3.4.1 DENSIDADE DE DESCARGAS	22
3.4.2 PARÂMETROS DA CORRENTE DE DESCARGA	23
3.4.3 EFEITO CORONA E CORRENTES PRÉ-RUPTURA	24
<b>3.5 RESUMO DOS PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA NOS MECANISMOS DE DESLIGAMENTO POR DESCARGA</b>	<b>25</b>
<b><u>4. SITUAÇÃO TÍPICA: LINHA DE TRANSMISSÃO 500KV</u></b>	<b><u>26</u></b>
4.1 HISTÓRICO DA LINHA	26
4.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA LINHA	27
4.3 CARACTERÍSTICAS DE ATERRAMENTO DA LINHA	28
4.4 ANÁLISE DO HISTÓRICO DE DESLIGAMENTOS DA LINHA	30
4.4 MEDIÇÕES DE RESISTÊNCIAS DE ATERRAMENTO	33
4.5 IMPACTO DE FALTAS EM LINHA DE 500KV	35
4.5.1 PERSPECTIVA DO SISTEMA ELÉTRICO	35
4.5.2 PERSPECTIVA ECONÔMICA	38
<b><u>5. ANÁLISE DA LINHA DE 500KV COM O SOFTWARE SIGMA</u></b>	<b><u>40</u></b>
5.1 INTRODUÇÃO	40
5.2 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES DO SIGMA SLP	40
5.2.1 DESCRIÇÃO GERAL	40
5.2.2 MODELAGEM DA LINHA DE TRANSMISSÃO	41
5.2.3 SIMULAÇÃO DE INCIDÊNCIA DE DESCARGAS	47
5.2.4 ESTUDOS MÚLTIPLOS	48
5.3 ANÁLISE DOS TRECHOS CRÍTICOS DA LINHA	48
5.3.1 POR TRECHOS	49
5.3.2 POR ESTUDOS MÚLTIPLOS	59
5.4 ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS NO SIGMA SLP	63
<b><u>6. AVALIAÇÃO DE RUPTURA A MEIO DE VÃO CONSIDERANDO O EFEITO CORONA E CORRENTES PRÉ-RUPTURA</u></b>	<b><u>64</u></b>
6.1 INTRODUÇÃO	64
6.2 INFLUÊNCIA DO EFEITO CORONA NA PROPAGAÇÃO DE ONDAS ASSOCIADAS A CORRENTES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	65
6.2.1 DESCRIÇÃO DO FENÔMENO	65

---

---

6.2.2 ATENUAÇÃO E DISTORÇÃO DE ONDAS DEVIDO AO EFEITO CORONA	67
<b>6.3 EVOLUÇÃO DA MODELAGEM DE EFEITO CORONA PARA SIMULAÇÕES DE TRANSITÓRIOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO</b>	<b>69</b>
6.3.1 MODELAGEM PELO AUMENTO DO RAIO EQUIVALENTE DO CONDUTOR	69
6.3.2 MODELAGEM POR CIRCUITOS ANÁLOGOS	70
6.3.3 MODELAGEM ANALÍTICA DA CURVA Q-V	72
6.3.4 APLICAÇÃO DOS MODELOS	76
<b>6.4 INFLUÊNCIA DO EFEITO CORONA NO DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS: RUPTURA A MEIO DE VÃO</b>	<b>78</b>
6.4.1 INTRODUÇÃO	78
6.4.2 CONDIÇÃO PARA RUPTURA A MEIO DE VÃO ENTRE CABO DE BLINDAGEM E FASES	78
6.4.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	79
<b>6.5 ANÁLISE E DISCUSSÕES</b>	<b>89</b>
6.5.1 ATENUAÇÃO NO PONTO DE INCIDÊNCIA	89
6.5.2 VALORES ABSOLUTOS DE SOBRETENSÃO NO PONTO DE INCIDÊNCIA	91
6.5.3 PROBABILIDADE DE RUPTURA A MEIO DE VÃO	97
<b>6.6 RUPTURA A MEIO DE VÃO ENTRE CABOS PARARRAIOS E FASES: INFLUÊNCIA DAS CORRENTES PRÉ-RUPTURA</b>	<b>102</b>
<b>7. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE</b>	<b>107</b>
<b>7.1 INTRODUÇÃO</b>	<b>107</b>
<b>7.2 RESULTADOS DESENVOLVIDOS</b>	<b>108</b>
7.2.1 CONCLUSÕES GERAIS	108
7.2.2 CONCLUSÕES SOBRE A RUPTURA A MEIO DE VÃO CONSIDERANDO EFEITO CORONA E CORRENTES PRÉ-RUPTURA	109
<b>7.3 PROPOSTA DE CONTINUIDADE</b>	<b>110</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>111</b>

---

# 1 Introdução

## *1.1 Relevância da Investigação*

No presente cenário do setor elétrico brasileiro, as empresas de energia elétrica atualmente têm tido uma grande preocupação em mitigar causas de desligamento recorrentes como queimadas, vandalismo, vegetação próxima a linha e descargas atmosféricas. Neste contexto também encontra-se em vigor a parcela variável por indisponibilidade, um desconto aplicado na receita dos ativos de transmissão que excedem os tempos máximos de desligamento permitidos pelo órgão regulador. Existe também o limite máximo de frequência de ocorrências por descargas atmosféricas estabelecidos pelo ONS (Operador Nacional do Sistema).

Como se sabe, a causa mais freqüente de desligamentos não-programados no sistema elétrico são as descargas atmosféricas. Falhas provocadas por descargas são consideradas comuns em muitos casos e normalmente são eliminadas pelas proteções do sistema, que religam automaticamente o circuito em questão de poucos segundos. Todavia, quando há reincidência de desligamentos dessa natureza em uma linha, isto pode levá-la a exceder sua freqüência de desligamentos aceitável e comprometer a qualidade da energia que é entregue aos clientes atendidos. Caso haja algum outro problema no sistema que impeça o seu religamento, pode ocorrer inclusive indisponibilidade da linha, acarretando em incidência de parcela variável e possivelmente em prejuízos não só para a empresa, mas para toda a sociedade.

Existem vários fatores que podem levar uma linha de transmissão a ter desligamentos por descarga atmosférica, o mais comum e conhecido é o de valor elevado de resistência de aterramento, causa mais comum de ocorrência de *backflashover*, mecanismo também mais usual de desligamento por descarga. *Software* e metodologias de cálculo de desempenho de linhas normalmente têm seu foco voltado para representar bem os transitórios envolvidos em ocorrências desse tipo.

No caso de linhas de extra-alta tensão, surgem alguns fenômenos importantes, que, muitas vezes, não são modelados adequadamente, ou até mesmo são desconsiderados em cálculos de desempenho, devido à sua complexidade, o que pode levar a conclusões

---

equivocadas, ou deixar dúvidas a respeito dos resultados de simulações de desempenho de linhas. Podem ser citados como exemplos o mecanismo de ruptura a meio de vão provocado por elevadas sobretensões em vãos longos (Soares Jr, 2001), a presença do Efeito Corona na propagação dos surtos de tensão mais elevada (Rocha, L.C., 2009) e a existência das Correntes de Pré-ruptura que fluem no espaçamento entre fase e cabos pára-raios antes da sua ruptura.

Neste trabalho são apresentados os resultados de uma pesquisa realizada sobre esses importantes fenômenos que devem ser levados em consideração em avaliações de desempenho de linhas de transmissão. Foram fundamentais para a realização deste trabalho a experiência desenvolvida no LRC (*Lightning Research Center*, UFMG) em estudos de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas e a disponibilidade de dados e informações providos pela CEMIG sobre de linhas de transmissão no estado de Minas Gerais.

## ***1.2 Objetivo e Metodologia***

Este trabalho tem como objetivo principal uma contribuição para o cômputo do mecanismo de desligamento por Ruptura a Meio de Vão em estudos de desempenho de linhas de transmissão de extra-alta tensão considerando, em particular, a presença do Efeito Corona.

Para tal o trabalho considera a evolução da modelagem deste efeito ao longo das últimas décadas para fins de sua aplicação em programas de cálculo de transitórios eletromagnéticos.

Também, a influência das Correntes de Pré-ruptura na ruptura a meio de vão é considerada, mas apenas segundo uma abordagem qualitativa.

Para consubstanciar as avaliações do trabalho optou-se por adotar a metodologia de simulação computacional do desempenho de uma linha real de 500 kV, tratada como caso estudo, frente a descargas atmosféricas, explorando-se as diferentes formas apresentadas na literatura para cômputo do Efeito Corona e a análise do seu impacto no desempenho da linha.

---

---

### 1.3 Organização do Texto

Esse texto é dividido em oito capítulos, que são descritos a seguir:

O presente **Capítulo 1** introduz o trabalho, apresenta o cenário em que ele está inserido e seus objetivos.

No **Capítulo 2**, são apresentadas as fontes mais comuns de desligamentos em linhas de transmissão e descritas suas características típicas que são úteis no momento de identificar e classificar as causas de ocorrências mais frequentes em linhas. É feita uma abordagem mais detalhada dos mecanismos de ruptura de isolamento por descargas atmosféricas.

No **Capítulo 3**, são analisados os fatores de maior influência em desligamentos de linhas de transmissão por descargas atmosféricas. Esses fatores são divididos em parâmetros ambientais, físicos e de descarga atmosférica e para cada parâmetro apresentado é feita uma avaliação qualitativa da sua influência nos três mecanismos de ruptura por incidência de descarga direta.

No **Capítulo 4**, é apresentada a linha de transmissão de 500 kV que é usada como exemplo nos estudos realizado neste texto. São apresentadas suas características, histórico de desligamentos, dados de aterramento e por fim é apresentado o impacto de uma indisponibilidade nesta linha para o setor elétrico e para a sua concessionária.

No **Capítulo 5**, são descritas as características do aplicativo computacional SIGMA SLP utilizado na simulação do desempenho da linha apresentada. São também apresentados e analisados os resultados obtidos para os trechos críticos da linha e as potencialidades e oportunidades de melhoria do *software*.

Baseado nas análises e conclusões dos capítulos anteriores, o **Capítulo 6** aborda a avaliação de fenômenos não considerados em metodologias e *software* convencionais: a presença de Efeito Corona e Correntes de Pré-ruptura. É investigada a probabilidade de ocorrência de rupturas a meio de vão considerando os fenômenos estudados.

O **Capítulo 7** trata das conclusões e propostas de continuidade deste trabalho. As referências bibliográficas consultadas para elaboração do texto encontram-se no **Capítulo 8**.

---

# 2 As Fontes de Desligamentos Não-programados de Linhas de Transmissão de 230 a 500 kV

## *2.1 Introdução*

Neste capítulo são abordadas as características das principais fontes de desligamentos não-programados em linhas de transmissão. Uma das primeiras etapas no estudo de desempenho de linhas é a identificação das causas de faltas. Essa informação é essencial na elaboração de um projeto de melhoria de desempenho eficaz.

Quando ocorre uma falta em uma linha, são geradas nela surtos de tensão e corrente, que se propagam em ambas as direções rumo aos seus terminais de acordo com a velocidade de propagação do surto na linha. Tais surtos se comportam como ondas viajantes e sofrem reflexões e refrações devido às discontinuidades do sistema. Esse processo de reflexões sucessivas se repete até que seja alcançada a condição de regime permanente associado ao distúrbio.

Tomando-se o circuito equivalente de Thevenin visto da barra de falta para as três seqüências (zero, positiva e negativa) é possível determinar as correntes e tensões numa falta pela superposição dos circuitos pré-falta e pós-falta. Além das correntes e tensões, podem ser determinadas a distância da falta ao terminal da linha e o seu valor da impedância (Pereira e Silveira, 2002).

Atualmente a localização de faltas é realizada por meio de algoritmos computacionais, com grande precisão. Pelo valor da impedância da falta, é possível também se ter uma idéia das possíveis causas da perturbação. A Tabela 2-1 a seguir apresenta algumas das causas mais

freqüentes de desligamentos não-programados com os respectivos valores típicos de impedância de falta (Sousa *et al*, 2005):

<i>Causa</i>	<i>Resistência de falta (<math>\Omega</math>)</i>
Descarga atmosférica	0 a 10
Queimada	10 a 70
Queda de estrutura	20 a 30
Árvore	100 a 150

Tabela 2-1 - Valores típicos de resistência de falta por causa (adaptada de Sousa *et al*, (2005))

## ***2.2 Fontes de Desligamento das Linhas de Transmissão***

A seguir, estão caracterizadas as principais fontes de desligamento em linhas e algumas ações comumente adotadas pelas empresas de energia para preveni-las.

### ***2.2.1 Queimadas***

Desligamentos por queimadas em linhas de transmissão ocorrem quando um incêndio sem controle, provocado por motivos naturais, queimas agrícolas ou florestais ou vandalismo, se propaga por um meio combustível (geralmente vegetação) nas proximidades ou sob a linha. Esse foco de calor promove uma elevação na temperatura, conseqüentemente alterando a constituição química do ar, o que diminui a rigidez dielétrica entre os condutores e entre os condutores e o solo provocando faltas fase-fase ou fase-terra que muitas vezes impossibilitam o religamento automático da linha (Fonseca et al., 1999).

As ocorrências por queimada tem valor de impedância de falta normalmente mais elevados que os provocados por descargas atmosféricas e normalmente são sucedidos por religamento automático não satisfatório, acarretando na necessidade de religamento manual e as vezes, necessidade de inspeção na linha pela equipe de manutenção.

Para tentar mitigar o problema das queimadas, as empresas de energia atuam preventivamente com campanhas de conscientização da população e de proprietários rurais para formar opinião pública desfavorável à prática de queimadas. Também é realizada a limpeza periódica das faixas de servidão para diminuir a probabilidade de evolução das queimadas sob linhas.

### **2.2.2 Vegetação**

O crescimento de espécies de vegetação de porte elevado na faixa de servidão ou nas suas áreas limítrofes pode provocar curtos-circuitos em linha. Para níveis de tensão acima de 230 kV, a proximidade entre as árvores e o cabo condutor da linha de transmissão é muitas vezes suficiente para levar à disrupção, com o estabelecimento de arco elétrico.

Os desligamentos provocados por vegetação podem ser transitórios (ex.: aproximação de árvore por vento) ou permanentes (ex.: queda de árvore sobre a linha). Os desligamentos transitórios tem religamento automático satisfatório, enquanto os permanentes provocam a indisponibilidade da linha. É importante ressaltar que normalmente ocorrências desse tipo envolvem apenas as fases laterais quando a linha tem suas fases dispostas horizontalmente.

Nos casos de faltas permanentes por vegetação, as equipes de manutenção vão a campo para corrigir o problema, mas a forma de atuação para evitar falhas dessa natureza é preventiva, assim como nas falhas provocadas por queimadas. As ações mais comuns são a limpeza periódica da faixa de servidão e conscientização da população rural e plantadores de eucalipto para evitar o plantio das espécies dentro da faixa ou em locais onde as mesmas possam se aproximar dos cabos condutores.

### **2.2.3 Perda de Isolamento**

Desligamentos causados por perda no isolamento podem ter sua origem em vandalismo, poluição ou, por exemplo, pela ação de animais. Uma das ocorrências freqüentes deste tipo é a deposição de excrementos de aves, como as curicacas, na cadeia de isoladores. Essas falhas normalmente são transitórias e de baixa impedância, ocorrendo predominantemente no período noturno, quando as aves se abrigam nas torres.

Algumas ações preventivas que podem ser citadas no sentido de mitigar a perda de isolamento são: no caso de ação de aves, impedir o seu deslocamento sobre as cadeias de isoladores através de dispositivos especiais projetados com este fim, como chapéu chinês ou cobertura de PVC; no caso de vandalismo instalar isoladores poliméricos no lugar de cadeias de isoladores de vidro; no caso de poluição intensa aplicar revestimento polimérico, aumentar a distância de isolamento da cadeia ou efetuar a lavagem das cadeias de isoladores periodicamente.

### **2.2.4 Falhas de Natureza Mecânica**

Falhas mecânicas em linhas podem ter origens diversas. Os principais exemplos de ocorrência dessa natureza são:

---

- Rompimento de cabo: ruptura de cabos condutores por fadiga, sobrecarga ou descarga elétrica.
- Rompimento de Cadeia de Isoladores: Ruptura da cadeia de isoladores devido à deterioração, eletrocorrosão dos pinos, encaixe inadequado, envelhecimento precoce ou sobrecarga mecânica.
- Queda de estrutura: Tombamento da estrutura devido erosão do solo, oxidação de peças, ventos, vandalismo ou enchentes.

Apesar de sua baixa frequência, as conseqüências desse tipo de falha normalmente são graves e requerem que a linha seja restabelecida somente após intervenção da manutenção.

### ***2.2.5 Causas Externas***

Ocorrências provocadas por causas externas são aquelas ocasionadas por problemas externos ao sistema elétrico, como por exemplo: descargas atmosféricas, sistemas de irrigação, objetos jogados pelo vento, balões, etc. Desligamentos dessa natureza são normalmente transitórios e as ações para mitigar a causa irão depender do contexto e da região caso haja reincidência. Mas, dentre as causas externas, têm destaque absoluto as descargas atmosféricas, que por esse motivo merecem um tratamento dedicado.

## ***2.3 Desligamentos devido a Descargas Atmosféricas***

A partir deste item, é dada ênfase à descarga atmosférica, que é o principal mecanismo de desligamento não-programado em linhas. Esse tipo de desligamento possui como característica uma baixa impedância de falta e, normalmente, pode ser correlacionado com a ocorrência de descarga localizada através de um Sistema de Localização de Descargas Atmosféricas – *LLS (Lightning Location System)* (Mesquita, 2001) ou em alguns casos por inspeção de campo.

Em desligamentos provocados por descargas em linhas há o estabelecimento de sobretensões nas cadeias de isoladores da linha ou entre condutores desta, que levam à ruptura do seu isolamento, seja por incidência indireta ou direta de descarga atmosférica.

### ***2.3.1 Incidência Indireta***

Na ocorrência de uma descarga próxima à linha, mas que não a atinge, cada elemento de corrente que compõe o canal da descarga atua como uma fonte de campo eletromagnético, que “ilumina” a linha induzindo uma tensão com intensidade dependente do valor de pico da corrente e tempo de frente de onda da descarga. De acordo com Visacro (2005), nessa situação

---

as amplitudes das sobretensões induzidas nos condutores podem ter valores máximos da ordem de algumas centenas de quilovolts, o que representa uma preocupação para o desempenho de sistemas elétricos de baixa e média tensão (Silveira, 2006).

As linhas de extra-alta tensão possuem tensão máxima de suportabilidade ao impulso da ordem de 800 a 2.000 kV ou maior, logo, as tensões induzidas por descargas indiretas não lhes apresentam risco. Como o foco do texto são as linhas com tensão igual ou maior a 230 kV, os efeitos da incidência indireta de descargas não são aqui considerados.

### **2.3.2 Incidência direta**

Nas linhas de tensão igual ou maior a 230 kV, a incidência direta de descargas é o fenômeno que, de fato, tem maior probabilidade de provocar desligamento. Há três mecanismos básicos de ruptura por incidência direta de descargas na linha (Visacro, 2007a):

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

#### **2.3.2.1 Flashover**

O *flashover* é uma disrupção no isolamento de uma linha devido à incidência direta de uma descarga atmosférica nos cabos condutores, seja por ausência de cabos de blindagem ou por falha de blindagem.

A corrente da descarga, ao incidir diretamente nos condutores, divide-se em duas ondas de corrente de amplitude aproximadamente iguais, que viajam para cada lado a partir do ponto de incidência. As correntes ( $I$ ) geram ondas de sobretensões com amplitudes iguais ao seu produto pela impedância de surto ( $Z_s$ ) da linha,  $\bar{V} = \bar{Z}_s \cdot \bar{I}$ . Para ondas impulsivas rápidas, como normalmente são caracterizadas as ondas de descargas, a impedância de onda se aproxima da impedância de surto da linha  $Z_s = \sqrt{L/C}$  (Visacro, 2005), sendo  $L$  e  $C$  a indutância e capacitância por km da linha, respectivamente.

Ao atingir a primeira estrutura aterrada, a cadeia de isoladores ali presentes é submetida à onda de tensão que acompanha a onda de corrente do surto. A amplitude da sobretensão na maioria das vezes é capaz de provocar uma falha de isolamento e estabelecer um curto-circuito entre a fase e a terra se o arco elétrico proveniente da ruptura do isolamento for mantido pela

---

corrente de baixa frequência, sustentada pela tensão de trabalho da própria linha de transmissão. A Figura 2-1 a seguir ilustra a situação característica de um *flashover*:

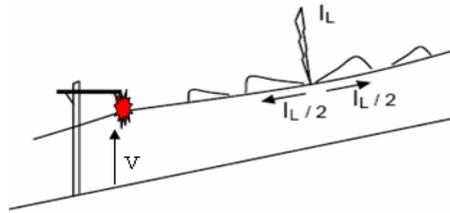


Figura 2-1 - Ruptura de isolamento por *flashover*. Figura adaptada de (Visacro, 2005)

Os cabos de blindagem, também conhecidos como cabos pára-raios, são a prática mais usual de prevenção de *flashover* e seu uso em linhas de extra-alta tensão, no Brasil, é bastante comum. Todavia, mesmo com sua aplicação, ainda podem ocorrer desligamentos por falha de blindagem, devido à ocorrência de descargas de baixa amplitude de corrente, mas ainda capazes de gerar uma sobretensão suficiente para exceder a suportabilidade do isolamento.

Um dos modelos utilizados nos projetos de proteção de linhas de transmissão para posicionar os cabos de blindagem é o modelo eletrogeométrico. Este modelo, de acordo com Visacro (2005), baseia-se no conceito simplificado de raio de atração, que é basicamente a distância estimada a partir da qual ocorrerá eventual fechamento do percurso entre o canal descendente da descarga e o ascendente originado na estrutura. A quantificação do raio de atração ( $R_a$ ) foi desenvolvida empiricamente, a partir de modelos de incidência. Este raio é fortemente influenciado pelo valor de pico de corrente de descarga ( $I_p$ ). A Tabela 2-2 mostra exemplos da relação entre as duas grandezas adotada pela norma brasileira ABNT NBR-5419 e por Eriksson (1987).

Referência	Raio de Atração ( $R_a$ )
ABNT NBR-5419	$R_a = 2 \cdot I_p + 30(1 - e^{-I_p})$
Eriksson (1987)	$R_a = 0,84 \cdot H^{0,6} \cdot I_p^a$ Onde $a = 0,7H^{0,02}$

Tabela 2-2 – Expressões para cálculo do raio de atração - ( $H$  – altura da torre,  $I_p$  – corrente de pico da descarga)

O raio de atração do cabo de blindagem para descargas com correntes de baixa intensidade é bem reduzido em relação àquele das descargas de maior amplitude, o que aumenta a probabilidade de exposição dos cabos fase à incidência direta de descargas menos intensas.

A relação sugerida pela NBR 5419 (2005) é baseada nos modelos desenvolvidos a partir da década de 1960, por Brown, Hileman, Armstrong, Whitehead e outros. Essa relação não leva em consideração o efeito da altura das estruturas no raio de atração, que é considerada por Eriksson (1978). Para uma torre típica de 30m, conforme Eriksson (1987), o raio de atração se aproxima bastante das relações tradicionais. Porém, o acréscimo da influência da altura apresenta uma abordagem que, em uma linha com estruturas de alturas variadas, pode impactar no cálculo do ângulo de proteção dos cabos pára-raios e reduzir a probabilidade de falha de blindagem.

### 2.3.2.1 – *Backflashover*

*Backflashover* é a disrupção do isolamento de uma linha provocada pela sobretensão resultante na cadeia de isoladores decorrente da incidência direta de descargas no cabo de blindagem ou na torre (Figura 2-2).

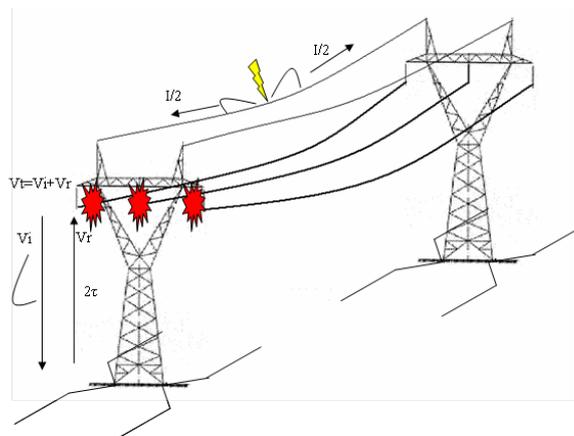


Figura 2-2 – Ruptura de isolamento por *backflashover*

Os cabos de blindagem são usados na tentativa de evitar a incidência direta nos condutores fase e para conduzir a onda de corrente de eventuais descargas interceptadas até as estruturas aterradas adjacentes. Todavia, quando a corrente da descarga e a sobretensão associada viajam nos cabos de blindagem e encontram a primeira torre aterrada, as ondas se dividem em componentes. Uma parcela é refletida, a outra continua viajando nos cabos de blindagem, a outra desce a estrutura em direção ao solo. Quando a onda de sobretensão associada atinge o solo, ela é submetida a uma reflexão, devido à descontinuidade da

impedância de surto da torre ( $Z_T$ ) com a impedância de aterramento ( $Z_G$ ). As equações 2-1 e 2-2 modelam aproximadamente o comportamento da onda de sobretensão refletida no solo:

$$\Gamma = \frac{Z_G - Z_T}{Z_G + Z_T} \quad \text{Equação 2-1}$$

$$V_R = \Gamma \cdot V_I \quad \text{Equação 2-2}$$

Onde:

$V_I$  e  $V_R$  são respectivamente as ondas de tensão incidente e refletida.

$Z_G$  e  $Z_T$  são respectivamente a impedância de aterramento e a impedância de surto da torre.

Se a impedância de aterramento não for muito reduzida (bem inferior à impedância de surto da torre), a amplitude da onda de sobretensão resultante no topo da torre (resultado da superposição da onda incidente positiva e a onda refletida negativa, já computado o deslocamento associado ao tempo de tráfego na torre), pode ser muito elevada. A sobretensão na cadeia de isoladores dada pela diferença entre a sobretensão no topo e a tensão da fase, pode exceder a suportabilidade do isolamento da linha provocando uma falha no isolamento da estrutura para a fase, caracterizando o fenômeno conhecido como *backflashover* (Visacro, 2007a). A Figura 2-3 abaixo mostra a composição da onda de sobretensão no topo da torre:

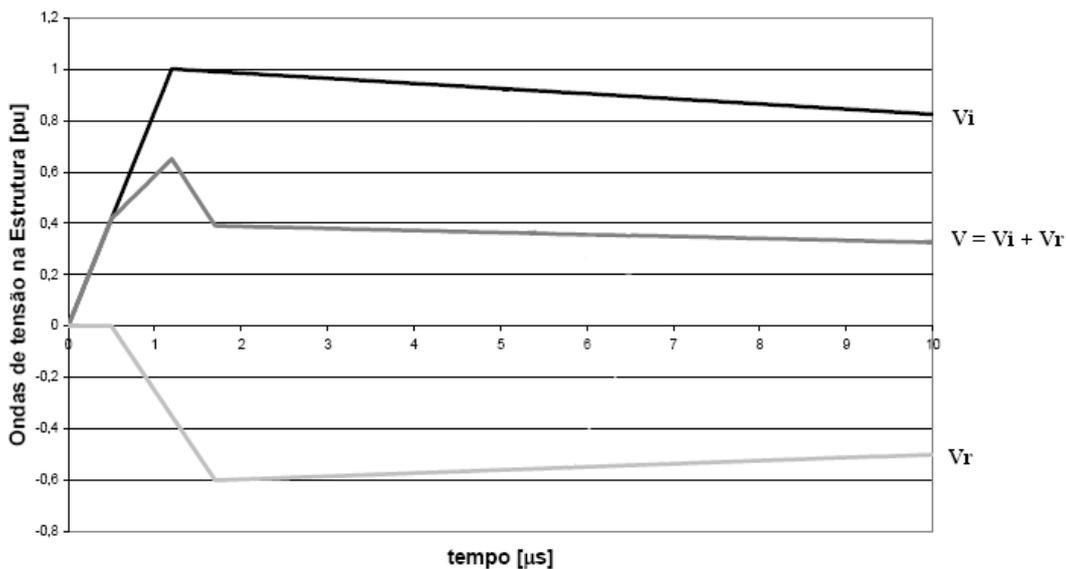


Figura 2-3 – Tensão resultante no topo da torre (adaptada de Visacro (2005))

Como o *backflashover* é o mecanismo mais freqüente de desligamentos não-programados em linhas de transmissão (que possuem cabo de blindagem) por descarga atmosférica, a maior parte dos esforços para melhoria de desempenho de linhas são direcionados para esse tipo de mecanismo (Visacro *et al.*, 2004), (Miranda *et al.*, 2007), (Rocha e Cunha, 2008). Os parâmetros de influência responsáveis por este tipo de falha são analisados com mais detalhes no capítulo 3.

### 2.3.2.3 – Ruptura a meio de vão

Apesar desse tipo de evento não ser muito comum na maior parte das configurações de linhas, as rupturas a meio de vão tornam-se mais prováveis de ocorrência em caso de espaçamento reduzido entre condutores fase e de blindagem ou em caso de vãos extensos (> 300m) (EPRI, 2004).

Em linhas de transmissão de extra-alta tensão com vãos muito longos, ao incidir no meio do vão no cabo pára-raios, uma descarga tem sua corrente dividida em duas componentes de amplitudes aproximadamente iguais que viajam até as primeiras torres adjacentes aterradas, da mesma forma como ocorre em um *backflashover*. Todavia, como o vão é muito longo, o tempo de trânsito é maior e a onda de sobretensão refletida na primeira estrutura aterrada sofre um atraso para retornar ao ponto de incidência. Até a chegada da onda refletida, a onda incidente prevalece e a sobretensão resultante pode atingir valores elevados, dependendo do tempo de frente da onda. Se este parâmetro for reduzido, segundo Soares Jr et al. (2005), a amplitude das sobretensões desenvolvidas no ponto de incidência, em relação a outros pontos ao longo da linha, podem ser consideravelmente mais elevadas, podendo alcançar uma intensidade três vezes maior do que o valor obtido se a descarga incidisse no topo da torre.

Alguns autores classificam este tipo de evento como um *backflashover*. Dadas as particularidades deste evento em relação àquele que ocorre na cadeia de isoladores junto à torre, preferiu-se considerar este mecanismo separadamente.

A sobretensão resultante é dada pela diferença das amplitudes das ondas de sobretensão no ponto de incidência e na fase mais próxima, conforme Rocha, L. C. (2009). Neste caso, para haver uma *ruptura* a meio de vão é necessário que o valor de pico da onda de sobretensão no isolamento de ar entre o cabo de blindagem e a fase seja capaz de causar um campo elétrico médio maior do que 623 kV/m (EPRI, 1982).

Segundo Udo (1997), a probabilidade de ocorrência de ruptura a meio de vão em relação a outros tipos de desligamento é da ordem de 1 a 5% para linhas de extra-alta tensão. No capítulo 6 é realizada uma análise mais detalhada dessa probabilidade.

---

# 3 Parâmetros de Influência nos Desligamentos Causados por Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão

## *3.1 Introdução*

Neste capítulo são apresentados alguns parâmetros de influência que impactam diretamente o desempenho de linhas de extra-alta tensão frente a descargas atmosféricas. Esses parâmetros são aqui tratados por tema e é avaliada a sua influência sobre os mecanismos de desligamento por descarga: *flashover*, *backflashover* e ruptura a meio de vão.

## *3.2 Parâmetros Ambientais*

### *3.2.1 Variação de Relevo*

Linhas de transmissão de extra-alta tensão podem percorrer centenas de quilômetros e atravessar vários tipos de relevo e obstáculos no seu percurso como vales, montanhas e rios. A variação do relevo no percurso de uma linha pode afetar o seu desempenho pelo aumento da sua exposição à incidência de descargas. O grau de exposição pode ser quantificado pelo parâmetro densidade de descargas atmosféricas, que é discutido em maiores detalhes no item 3.4.1.

Uma torre de linha de transmissão localizada em um ponto elevado em relação às redondezas se constitui em um ponto preferencial de incidência de descargas. A densidade de descargas local tende a ser superior àquela das regiões baixas adjacentes, como é denotado em Visacro (2005a) e Dias (2006).

Atualmente, com auxílio de ferramentas modernas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, é possível avaliar com boa precisão a variação de relevo em uma linha de transmissão e utilizar essa informação preventivamente nas etapas de planejamento, projeto e manutenção da linha (Figura 3-1). Este tipo de atuação pode ajudar a diminuir o impacto da variação do relevo no desempenho da linha.

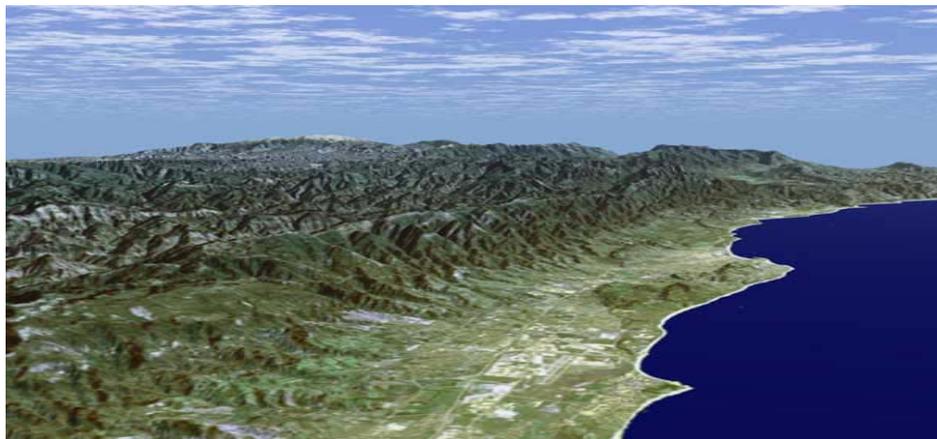


Figura 3-1- Mapa tridimensional obtido a partir de um MDE (Modelo digital de elevação)

O relevo pode afetar a densidade de descargas atmosféricas e, conseqüentemente, o número de descargas que incidem na linha, tornando esta densidade não uniforme, no caso de linhas instaladas em terrenos acidentados. A variação do relevo pode afetar também, indiretamente, outros parâmetros que impactam o desempenho da linha, como por exemplo: umidade do ar, altura cabo-solo e características do solo.

### ***3.2.2 Características de solo***

A influência do tipo de solo no desempenho de linhas está diretamente relacionada ao valor da sua resistividade, que, dentro de certas condições, possui uma relação quase linear com o valor da impedância impulsiva de aterramento.

Segundo Visacro (2002), algumas características do solo que influenciam diretamente no valor da sua resistividade são: tipo, umidade, concentração e tipos de sais dissolvidos na água, compactidade, granulometria, temperatura e estrutura geológica. Mais detalhes sobre como cada um desses parâmetros influencia na resistividade podem ser encontrados na referência.

---

Os solos de Minas Gerais são caracterizados por altos valores de resistividade, sendo admitido um valor médio de resistividade próximo a 2.500  $\Omega.m$ . Em algumas regiões, esta pode ultrapassar 5.000 e 10.000  $\Omega.m$ . O impacto da resistividade no valor da impedância impulsiva de aterramento pode ser observado na Figura 3-2, de acordo com o comprimento dos eletrodos.

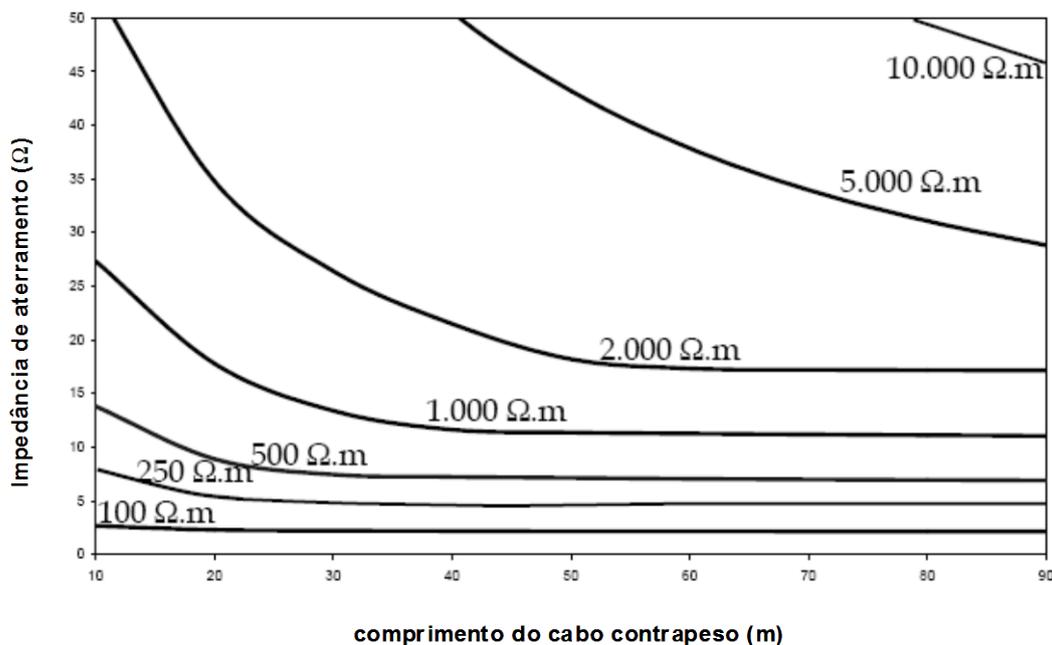


Figura 3-2 – Influência da resistividade no valor da impedância de aterramento, de acordo com o comprimento dos eletrodos (adaptado de Soares Jr. (1996))

Quanto maior a resistividade do solo, maior o comprimento do eletrodo necessário para se atingir o comprimento efetivo do aterramento, que é o comprimento de eletrodo em que se alcança o valor mínimo de impedância. O aumento adicional do eletrodo além do comprimento efetivo, apesar de possibilitar reduzir a resistência de aterramento, não é capaz de reduzir a impedância impulsiva equivalente (Soares Jr, 1996), (Visacro, 2007b).

Para valores elevados de resistividade, torna-se também mais difícil atingir valor de impedância impulsiva de aterramento suficientemente reduzido para mitigar o fenômeno do *backflashover*.

### 3.2.3 Fatores Climatológicos

Os fatores climatológicos de maior influência no desempenho de linha são a umidade local, a temperatura e a ação dos ventos. O impacto desses fatores é indireto sobre outros parâmetros que aumentam a probabilidade da linha sofrer desligamentos por *flashover* ou *backflashover*.

- **Umidade local**

A rigidez dielétrica do ar é influenciada diretamente pela sua umidade o que pode contribuir na redução da tensão de ruptura em superfícies isolantes dependendo das características físicas das cadeias de isoladores.

- **Temperatura**

Temperaturas mais altas provocam aumento da catenária dos condutores fase e pára-raios, diminuindo as distâncias cabo-solo. O aumento de temperatura também aumenta a taxa de evaporação da umidade do solo, o que eleva o valor da resistividade e conseqüentemente a impedância impulsiva de aterramento.

- **Vento**

A ação do vento pode influenciar na redução das distâncias entre os condutores e a torre, ou entre fases, conseqüentemente reduzindo as distâncias de isolamento da linha.

### 3.3 Parâmetros da Linha de Transmissão

#### 3.3.1 Blindagem

Cabos de blindagem são projetados para interceptar descargas atmosféricas e conduzir sua corrente até o solo através da torre e dos eletrodos de aterramento, com o objetivo de reduzir a chance de ocorrência de *flashover*. O posicionamento desses cabos é definido pelo ângulo de blindagem. Um dos modelos utilizados para cálculo do ângulo é o eletrogeométrico, conforme explicado anteriormente. Apesar disso, ainda podem ocorrer *flashover* por falha na blindagem (Brown, 1978).

Nas avaliações de desempenho de linhas frente a descargas, a corrente crítica ( $I_c$ ) requerida para ocorrência de *flashover* (valor mínimo de corrente) pode ser estimada pela seguinte equação:

$$I_c = \frac{2CFO}{Z_s} \quad \text{Equação 3-1}$$

Onde

- $Z_s$  é a impedância de surto da linha;
- CFO é a tensão de *flashover* crítica (*critical flashover overvoltage*).

Se a corrente crítica for reduzida, uma parcela considerável das falhas de blindagem poderá gerar *flashover*, seja em decorrência da incidência de um primeiro *stroke* de baixa amplitude de corrente ou de um *stroke* subsequente de amplitude também reduzida (IEEE, 1997).

A taxa de falhas de blindagem de uma linha é função do ângulo de blindagem ou geometria da linha em geral e da densidade de descargas atmosféricas para o solo. A blindagem de uma linha tem um maior impacto sobre *flashover* visto que, em princípio, um bom projeto é capaz de mitigar esse fenômeno.

### 3.3.2 Características de Isolamento

A suportabilidade dos isolamentos definida para uma determinada linha é projetada pensando-se na operação em regimes permanente ou transitório. A ruptura do isolamento é uma dos principais eventos que ocorrem quando acontece um *backflashover* ou *flashover*, e depende de três fatores basicamente (IEEE, 1997):

- características da sobretensão resultante da corrente da descarga como amplitude, forma de onda e polaridade;
- tensão instantânea na linha no momento da incidência da descarga;
- Suportabilidade das cadeias de isoladores.

O desempenho dielétrico da cadeia de isoladores é normalmente avaliado experimentalmente submetendo a cadeia à ensaios de impulso atmosférico com modelos de onda de descarga como por exemplo a dupla exponencial. O tempo de frente da onda é 1,2  $\mu$ s e o tempo de meia-onda é 50 $\mu$ s. A amplitude do impulso aumentada gradualmente até se alcançar uma tensão onde a cadeia de isoladores rompe em 50% dos testes. Essa tensão é chamada tensão disruptiva crítica (*CFO – Critical flashover voltage*).

Para se determinar a tensão resultante na cadeia de isoladores da linha, a onda de sobretensão gerada no topo da torre pela descarga deve ser subtraída do valor instantâneo dos condutores da linha, o que pode causar aumento ou diminuição da tensão. No caso de circuito trifásico CA, a sobretensão associada à descarga é sobreposta à tensão instantânea de cada fase e no caso de circuito DC, à tensão contínua de cada pólo. Neste último caso, o pólo positivo costuma experimentar mais *backflashover* que o pólo negativo, devido à maior frequência das descargas atmosféricas nuvem-solo de polaridade negativa.

---

O número de isoladores influencia diretamente no NBI (Nível Básico de Isolamento) da linha. A Tabela 3-1 a seguir apresenta os valores típicos de NBI e a quantidade de isoladores típica por nível de tensão (Cemig, 2010).

Nível de Tensão (kV)	NBI (kV)	Nº isoladores
230	975	11-14
345	1240	15-19
500	1612	22-28

Tabela 3-1 – Valores típicos de NBI das linhas e numero de isoladores por nível de tensão

A suportabilidade das cadeias de isoladores pode ser afetada pelas condições climáticas. Em altitudes elevadas, por exemplo, a densidade do ar diminui e, conseqüentemente, a rigidez dielétrica do ar pode variar, o que afeta a tensão suportável da cadeia de isoladores.

O nível de isolamento de uma linha impacta diretamente a sua taxa de *flashover* e *backflashover*, visto que a ocorrência desses dois mecanismos depende da tensão disruptiva crítica da cadeia.

### 3.3.3 Características da Torre e dos Cabos

As torres de linhas de transmissão de extra-alta tensão são naturalmente mais altas com maiores distâncias elétricas e número de isoladores nas cadeias. Todavia, com as distâncias mais amplas entre os cabos de blindagem e as fases, aumenta-se a probabilidade da ocorrência de falha de blindagem e a conseqüente incidência de descargas diretas nas fases, assim como se elevam os tempos de trânsito dos surtos na torre e a probabilidade de *backflashover*. Algumas características de torres de linhas de transmissão estão descritas a seguir.

#### - Altura da torre

A altura da torre influencia diretamente a sua probabilidade de captação de descargas atmosféricas. A partir de observações da incidência de descargas reais em estruturas, Eriksson (1987b), desenvolveu a seguinte relação para cálculo do número de descargas coletadas pela linha em função da altura da estrutura e outros parâmetros:

$$N_s = N_g \left( \frac{28h^{0,6} + b}{10} \right) \quad \text{Equação 3-2}$$

Onde:

$h$  é a altura da torre;

$b$  é o espaçamento dos cabos de blindagem;

$N_g$  é a densidade de descargas (*flashes/km<sup>2</sup>/ano*);

$N_s$  é a taxa de descargas coletadas (*flashes/100 km/ano*).

Pela equação, um aumento na altura média das torres provoca um aumento na incidência de descargas na linha e conseqüentemente na probabilidade de ocorrência de desligamento por incidência direta de descargas. A altura da torre também influencia o valor de sua impedância de surto e o tempo de trânsito.

#### - Impedância de surto da torre

A impedância de surto da torre influencia o valor do coeficiente de reflexão da onda de sobretensão no solo, juntamente com a impedância de aterramento, e ambas definem a amplitude da onda refletida e, conseqüentemente, a amplitude da sobretensão resultante nas cadeias de isoladores.

A impedância de surto de uma torre de transmissão ( $Z_T$ ) depende da sua geometria e pode variar ao longo da mesma. A modelagem desse elemento não é trivial. Em alguns casos ela é considerada como uma linha de transmissão vertical sem perdas, representadas por geometrias similares a de uma torre em formato de cone (equação 3-3) (Darveniza et al, 1969) ou cilindro (equação 3-4) (Wagner e Hileman, 1962).

$$Z_T = 30 \ln \left[ \frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right] \quad \text{Equação 3-3}$$

$$Z_T = 60 \ln \sqrt{2} \left( \frac{h}{r} \right) - 60 \quad \text{Equação 3-4}$$

Onde:

$h$  é a altura da torre;

$2r$  é o diâmetro da torre;

Em outros casos a modelagem deste elemento é feita numericamente com uso de equações de campo eletromagnético. Visacro et al. (2005) propuseram a modelagem da impedância de surto equivalente de vários tipos de torre, com uso de uma modelagem híbrida (HEM – *Hybrid Electromagnetic Model*) com aplicação direta das equações de campo e teoria de circuitos através de simulações computacionais.

O valor típico da impedância de surto de torres metálicas de transmissão está entre 150 e 250  $\Omega$ . Valores nesta faixa podem ser usados para análises qualitativas com boa aproximação para se ter idéia do desempenho de uma determinada torre de transmissão (Soares Jr, 1996).

- **Impedância de surto dos condutores**

Para ondas impulsivas rápidas, como são as ondas características de descargas atmosféricas, a impedância de surto de um condutor pode ser aproximada pela seguinte equação:

$$Z_s = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{Equação 3-5}$$

Onde:

L e C são os parâmetros indutância série e capacitância para terra do condutor por unidade de comprimento da linha.

Esta equação representa aproximadamente o comportamento da impedância da linha para fenômenos de alta frequência e é também chamada impedância de surto da linha. O produto de  $Z_s$  pela amplitude da corrente que trafega ao longo da linha em decorrência da incidência de uma descarga resulta na amplitude da sobretensão associada a esta corrente (Visacro, 2005).

- **Geometria dos condutores**

As características geométricas como distâncias entre cabos, raios dos condutores ou feixes de condutores podem influenciar também na probabilidade de ocorrência dos três mecanismos de ruptura por descarga em linhas de transmissão. Além de definirem os parâmetros elétricos da linha, a geometria dos condutores define as suportabilidades mínimas entre os condutores e os valores críticos de campo elétrico para surgimento de efeito corona associado à sobretensão causada pelas correntes das descargas (Peek, 2007), conforme é visto em maiores detalhes no Capítulo 6.

- **Comprimento dos vãos**

O comprimento dos vãos, assim como a altura da torre, interfere nos tempos de trânsito em caso de incidência direta de descarga nos cabos pára-raios. Vãos longos estão sujeitos a tempos de trânsito maiores e, conseqüentemente, a maior probabilidade de ocorrência de ruptura no meio do vão.

### 3.3.4 Impedância de aterramento

Os aterramentos elétricos de linhas de transmissão de extra-alta tensão escoam a maior parte das correntes de descargas atmosféricas incidentes nos cabos pára-raios e nas torres e são projetados fundamentalmente com a finalidade de garantir um desempenho adequado da linha frente ao fenômeno. Um sistema de aterramento é constituído basicamente por três componentes: os condutores que conectam o sistema aos eletrodos, os eletrodos e a terra ao redor deles (Visacro, 2007b).

No Brasil, a configuração típica de aterramento utilizada em linhas de transmissão é composta por cabos contrapeso radiais de aço-cobre 4AWG (copperweld) conectados aos pés das estruturas. As ferragens de fundação da torre são também consideradas parte do aterramento, conforme a Figura 3-3 abaixo:

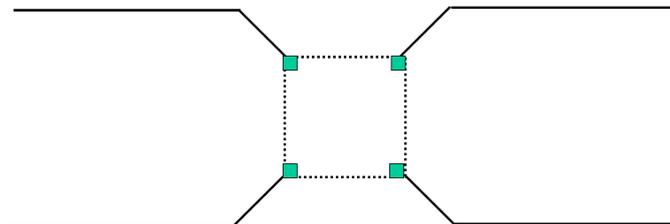


Figura 3-3 – Configuração típica de aterramento de linhas de transmissão

O aterramento é normalmente representado por uma impedância. As ondas de tensão e corrente impulsivas provenientes de descargas atmosféricas se propagam ao longo dos cabos contrapeso que se comportam aproximadamente como uma linha de transmissão em um meio com perdas. As ondas são atenuadas em diferentes níveis de acordo com o seu conteúdo de frequência. Deste efeito origina-se o conceito de comprimento efetivo discutido anteriormente (Visacro, 2007b), (Rosado, 2008).

É comum se utilizar o parâmetro impedância impulsiva  $Z_P$ , dada pelo quociente dos valores de pico das ondas de tensão e corrente na entrada do aterramento, para representar o comportamento do aterramento na sua condição mais crítica. Este parâmetro é útil também para cálculo da elevação de potencial do aterramento (*GPR – Ground Potential Rise*) no ponto de injeção de corrente, multiplicando-se seu valor pela amplitude máxima da corrente.

Apesar de se comportar como uma impedância, o termo mais usado para se referir ao aterramento é o de resistência, devido à maior viabilidade de medição desse parâmetro (Visacro, 2007a). Nas concessionárias de transmissão de energia, o critério de qualidade mais comum utiliza do para a resistência de aterramento é um valor igual ou inferior a 30  $\Omega$ . Conhecendo-se a configuração da malha de aterramento e o valor da resistência ( $R_{LF}$ ), é possível fazer

estimativas razoáveis para o valor da impedância impulsiva pela relação  $Z_p = 0.7 R_{LF}$  (Soares Jr, 1996), (Visacro e Rosado, 2008).

Deve-se atentar, todavia, para o fato de que um valor reduzido de resistência de aterramento não assegura valor reduzido para a impedância de aterramento. Isto fica claro ao se considerar que se o comprimento do aterramento for maior que o efetivo, sua resistência é reduzida, mas não haverá redução do valor da impedância de aterramento (Visacro, 2007b).

O valor da impedância de aterramento tem grande influência sobre a taxa de ocorrência de *backflashover* de uma linha de transmissão, porém seu impacto sobre a ocorrência de *flashover* e ruptura a meio de vão é reduzido. Neste último caso, o tempo longo (em relação ao tempo de frente de onda) requerido para o retorno da onda de sobretensão refletida na impedância do aterramento faz com que a contribuição desta onda negativa para redução da amplitude da onda de sobretensão resultante no ponto de incidência a meio de vão seja mínima.

### ***3.4 Parâmetros Relacionados à Descarga Atmosférica***

#### ***3.4.1 Densidade de Descargas***

A densidade de descargas atmosféricas para o solo ( $N_g$ ) indica a frequência de incidência geográfica de descargas numa determinada região e é representada pelo número de descargas plenas (“*flashes*”) por km<sup>2</sup>. Este parâmetro pode variar de uma região para outra devido à influência de diversos fatores como distribuição de chuvas e relevo, por exemplo. É importante atentar ao fato de que ao atribuir um determinado valor deste índice para uma região, deve ser preservada a perspectiva de que, para as áreas interiores à região, a densidade de descargas pode variar numa ampla faixa de valores (Dias, 2006).

Uma linha de transmissão pode percorrer regiões com densidades de descargas atmosféricas diferentes, principalmente devido à influência do relevo e da extensão da linha. Os trechos da linha localizados em pontos com maior densidade estão expostos a um risco maior de incidência de descargas. Por esse motivo, o cálculo deste parâmetro por trecho da linha é importante na avaliação de seu desempenho.

A densidade de descargas atmosféricas para a terra torna-se mais precisa através da utilização de dados de descargas obtidas por LLS (*Lightning Location Systems*) (Mesquita, 2001), (Naime, 2001). Para isso é importante que o sistema esteja calibrado apropriadamente para que os resultados sejam os mais próximos possíveis da realidade e das peculiaridades regionais de onde os sensores do sistema estão instalados (Silvino et al, 2003), (Mesquita,

2006), (Mesquita et al, 2006). A Figura 3-4 a seguir mostra um exemplo de densidade de descargas negativas entre 1999 e 2005 obtidas através de dados de LLS para o estado de Minas Gerais:

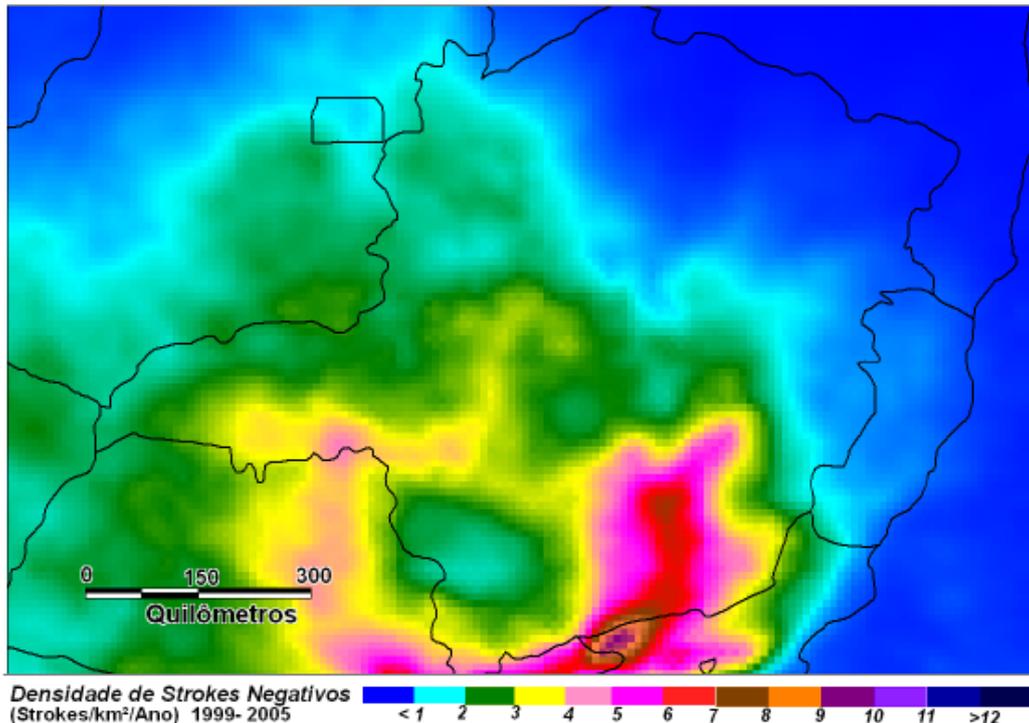


Figura 3-4 – Densidade de descargas negativas (1999 a 2005). Extraída da referência (Dias, 2006)

### 3.4.2 Parâmetros da Corrente de Descarga

De acordo com Visacro (2005), os parâmetros de maior influência no desempenho de uma linha são a intensidade da corrente e o tempo de frente, quando se analisa a incidência de descargas diretamente nas torres ou nos cabos pára-raios.

#### - Amplitude da corrente

A amplitude da corrente determina a amplitude das sobretensões desenvolvidas e desta forma, os níveis máximos de solicitação imposta pela corrente da descarga aos componentes do sistema. Isto torna este parâmetro o mais crítico para dimensionamento das características de projeto da linha.

A literatura em geral sugere a utilização de um valor mediano do pico da primeira corrente de descarga negativa de 30 kA (Berger e Anderson, 1975), mas medições realizadas na estação do Morro do Cachimbo evidenciam um valor um pouco mais elevado para a região: 45 kA (Schroeder, 2001), (Visacro et al., 2004a).

Dependendo das condições da linha, o impacto de uma corrente de 45 kA de um raio incidente num cabo pára-raios pode ser alto. Admitindo-se, a título ilustrativo, que uma parcela de 20 kA da corrente da descarga flua pela torre e que esta possua uma impedância de surto ( $Z_s$ ) de 120  $\Omega$ , a amplitude da sobretensão associada, caso o valor da impedância de aterramento seja igual à  $Z_s$ , é de 2,4 MV ( $V = Z_s.I$ ), o suficiente para provocar a disrupção do isolamento de uma torre de 500 kV.

#### - Tempo de frente da onda

De forma simplificada, pode-se dizer que é o tempo que decorre desde o início da onda impulsiva da descarga até o alcance do seu primeiro pico. A influência desse parâmetro no desempenho de linhas de extra-alta tensão está ligada ao comportamento dos isolamentos do sistema quanto à suportabilidade frente à sobretensões associadas a descargas e à sua relação com o tempo de trânsito da onda na torre.

Descargas negativas únicas têm em média tempo de frente entre 2 a 7  $\mu$ s (Visacro, 2005). Este tempo se torna mais reduzido em caso de descargas subseqüentes. Tempos de frente reduzidos aumentam a probabilidade de ocorrência de *backflashover* e ruptura a meio de vão em linhas.

Além destes, outros parâmetros relevantes que podem ser citados são tempo de meia onda, taxa de crescimento da corrente e carga total da descarga. Informações sobre esses parâmetros podem ser encontrados na referência (Visacro, 2005).

### 3.4.3 Efeito Corona e Correntes de Pré-ruptura

O efeito corona é um fenômeno não-linear que surge quando o campo elétrico nas proximidades do condutor excede a um valor crítico relacionado à rigidez dielétrica do ar provocando sua ionização. No caso das linhas, este efeito pode ser promovido em decorrência da sobretensão gerada no condutor pelo fluxo da corrente de descargas. Este efeito provoca a injeção de cargas no entorno do condutor, e pode ser modelado por um aumento do raio do mesmo e, conseqüentemente, da capacitância transversal da linha (Santiago, 1987). O efeito corona é um efeito que atenua as sobretensões associadas às correntes das descargas e por esse motivo é um fenômeno que reduz a probabilidade de ocorrência de desligamentos por descarga, principalmente no caso em que há o trânsito da onda (incidência da descarga no meio do vão).

As chamadas correntes de pré-ruptura surgem quando a sobretensão desenvolvida no condutor pela corrente de descarga atinge um valor acima do valor crítico para *flashover* e dá-se início ao processo de ruptura com a formação de canais de plasma (*streamers*). Antes do

---

aquecimento do gás e a fase de arco do *flashover*, correntes ionizantes de pré-ruptura são injetadas nos canais em formação, dando início ao processo de formação do *leader*. Segundo Wagner (1963), com a injeção dessas correntes, a tensão a qual está submetido o *gap* é reduzida, podendo cair abaixo do nível crítico inibindo a ruptura. Este fenômeno é tido como o principal fator de redução de probabilidade de ruptura a meio de vão.

Ambos os fenômenos aqui descritos são tratados com mais detalhes no capítulo 6.

### 3.5 Resumo dos Parâmetros de Influência nos Mecanismos de Desligamento por Descarga

A Tabela 3-2 resume os parâmetros de influência descritos nos itens anteriores e indica se cada um deles pode influenciar na ocorrência dos mecanismos de desligamento por descarga (*backflashover*, *flashover* e ruptura a meio de vão)

Parâmetro	<i>Flashover</i>	<i>Backflashover</i>	Ruptura a meio de vão
Relevo	X	X	X
Características do Solo		X	
Umidade do ar	X	X	
Temperatura	X	X	
Ação do vento	X	X	
Blindagem	X		
Isolamento	X	X	
Altura da torre	X	X	X
Impedância de surto da torre		X	X
Impedância de surto dos condutores	X	X	X
Geometria dos condutores	X	X	X
Comprimento dos vãos	X	X	X
Impedância de aterramento		X	
Densidade de descargas atmosféricas	X	X	X
Amplitude da corrente	X	X	X
Tempo de frente da onda		X	X
Efeito Corona	X	X	X
Correntes de pré-ruptura			X

Tabela 3-2 – Influência de parâmetros nos mecanismos de desligamento por descarga

# 4 Situação Típica: Linha de Transmissão de 500 KV

Para fins de ilustração da situação concreta de linhas de extra-alta tensão, que requerem uma abordagem de proteção contra descargas mais elaborada do que a adotada pelas metodologias mais tradicionais, decidiu-se dedicar um capítulo à apresentação da configuração de uma linha real bem como das questões envolvidas no seu desempenho frente a descargas atmosféricas.

A linha de 500 kV aqui considerada, até 2008, era a única linha neste nível de tensão que atendia a região leste de Minas Gerais. Recentemente foi construída em paralelo ao seu traçado outra linha de 500 kV, para aumentar a capacidade de transmissão para a região e melhorar a qualidade da energia para os consumidores.

## ***4.1 Histórico da Linha***

A linha em análise já está em operação há aproximadamente trinta anos e em 2003 foi seccionada em duas linhas. É uma linha de transmissão composta, em sua grande maioria, por torres autoportantes, conforme a Figura 4-1. A opção por este tipo de torre foi devido às significativas variações de relevo e vento no seu percurso e aos grandes esforços mecânicos envolvidos.

Entre 2003 e 2006 a linha em questão apresentou uma média de 3 a 4 desligamentos/100 km/ano correlacionados com a ocorrência de descargas atmosféricas, o que estaria acima do desempenho satisfatório requerido pelo ONS<sup>1</sup> (1,0 desligamento/100 km /ano para 500 kV).

---

<sup>1</sup> Operador Nacional do Sistema

## 4.2 Características Gerais da Linha

A Tabela 4.1 a seguir resume as características básicas da linha:

<b>Tensão de Operação</b>	500 kV
<b>Potência Nominal</b>	2026 MVA
<b>Condutor</b>	3xRuddy
<b>Pára-raios</b>	7/16 EHS
<b>Extensão da linha</b>	148,56 km
<b>Quantidade de estruturas</b>	302
<b>Altura média das estruturas</b>	40,26 m
<b>Altura média do condutor</b>	18,20 m
<b>Altura média do pára-raios predominante</b>	26,06 m
<b>Ângulo de proteção do pára-raios</b>	40° I, 20° E
<b>Vão médio:</b>	517,9 m
<b>Maior vão da linha:</b>	1186 m
<b>Altitude média da linha:</b>	810,3 m
<b>Estrutura com maior altitude</b>	1146,5 m

Tabela 4-1– Características da linha

A Figura 4-1 mostra as estruturas típicas da linha. A estrutura predominante da linha são do tipo AS, CS, DS, ES e AT. Não há estruturas do tipo estaiadas, mas apenas autoportantes. As alturas das torres variam no percurso da linha e influenciam diretamente no tempo de trânsito das ondas de correntes injetadas na torre.

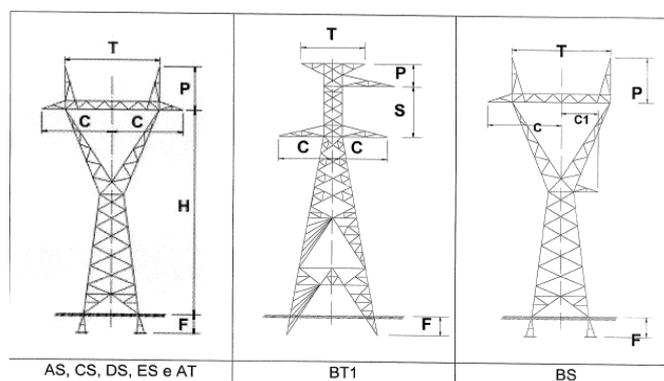


Figura 4-1 – Estruturas típicas da linha

A Figura 4-2 mostra o perfil de relevo ao longo da linha obtido a partir dos dados da planta de perfil de projeto. Há grande variação de altitudes, como pode ser observado no gráfico, destacando a possibilidade de influência do relevo no desempenho desta linha.

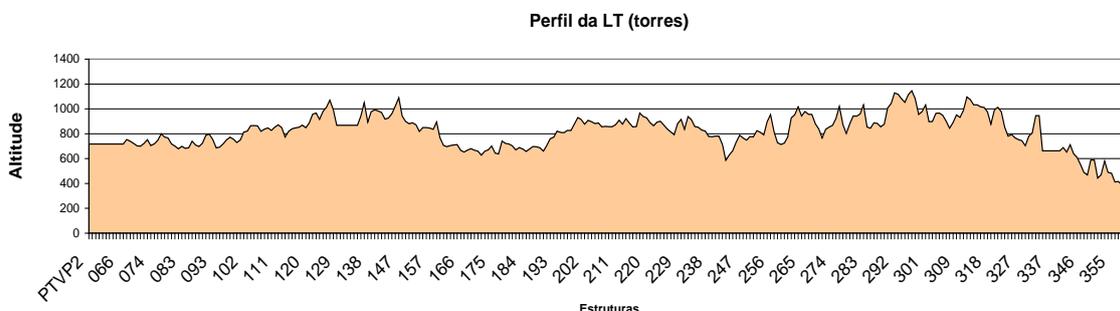


Figura 4-2 – Perfil de relevo das torres da linha

Além da acentuada variação da altitude das torres, vale também comentar que a linha possui outros aspectos que podem impactar diretamente o seu desempenho, particularmente o alto valor médio do comprimento dos vãos (existindo alguns vãos muito longos) e a predominância de estruturas autoportantes (Visacro, 2007).

### 4.3 Características de Aterramento da Linha

Como a região percorrida pela linha é uma região de solos com altas resistividades e, muitas vezes, rochosos, o histórico da linha mostra que, desde a época de projeto foi determinado que houvesse cuidados para assegurar que a linha tivesse valores baixos de resistência de aterramento. Este é um aspecto importante, porém mesmo se obtendo valores reduzidos de resistência, a impedância de aterramento ainda pode ser elevada, caso o comprimento do contrapeso seja maior do que o efetivo. Neste caso, um valor baixo de resistência de aterramento não assegura bom desempenho frente a descargas.

O aterramento da linha foi realizado com base numa seqüência de etapas definidas numa instrução específica (30.936-OT/PL1-0229b, 1979). A instalação do aterramento em cada uma das torres foi realizada na seguinte seqüência:

- 1) Lançamento da primeira etapa de cabos contrapeso, como indicado na Figura 4-3.

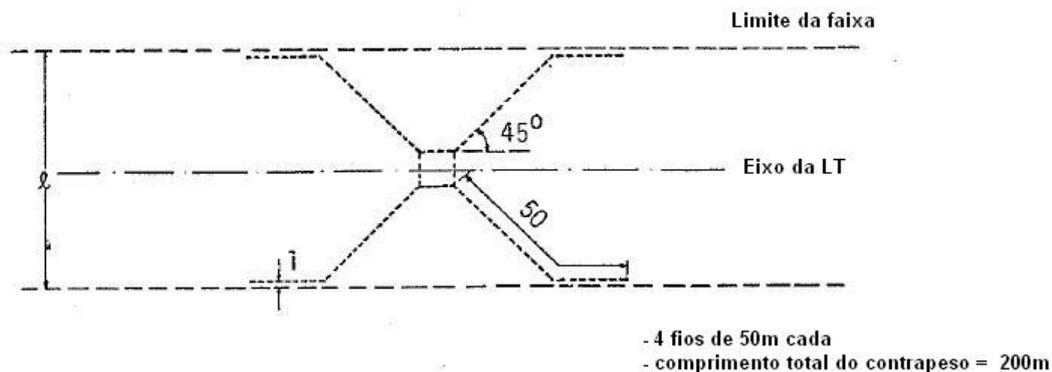


Figura 4-3 – Primeira etapa do procedimento de aterramento ( faixa de servidão: 70 m)

- 2) Medição da resistência de aterramento do arranjo com cabos contrapeso conectados à torre antes do lançamento dos cabos pára-raios. Se o valor da resistência fosse menor ou igual a  $30 \Omega$ , o aterramento era considerado concluído.
- 3) Caso a resistência tivesse valor superior a  $30 \Omega$  havia uma segunda etapa, com aumento do comprimento do fio contrapeso para 80m (cada perna), como mostra a Figura 4-4, e nova medição da resistência de aterramento do conjunto era realizada.

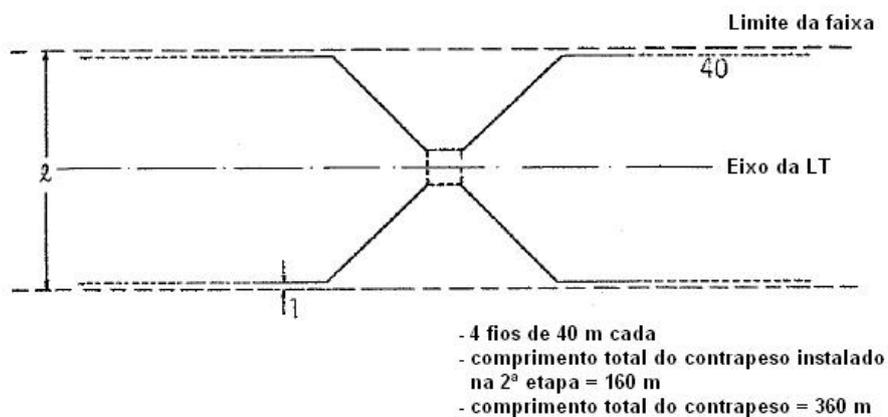


Figura 4-4 – Segunda etapa do procedimento de aterramento

- 4) Se o valor almejado de resistência não fosse alcançado poderia haver ainda uma terceira fase, com lançamento de comprimento adicional de fio contrapeso, Figura 4-5.

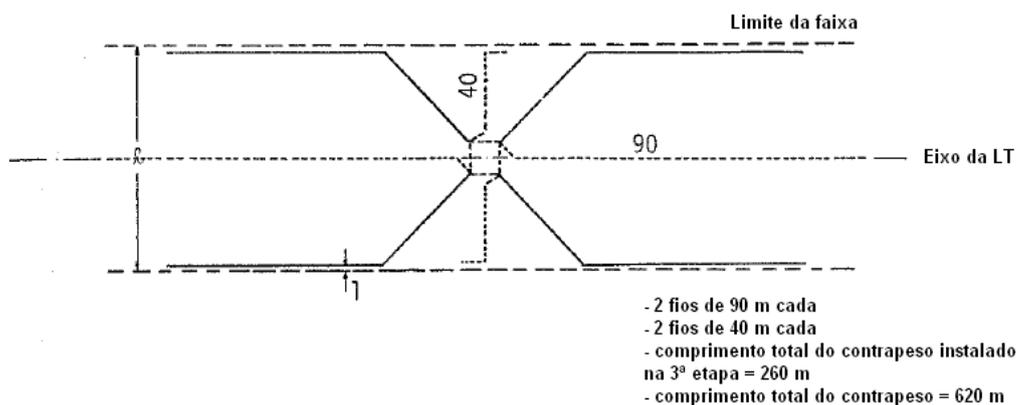


Figura 4-5 – Terceira etapa do procedimento de aterramento

Os demais detalhes do aterramento, como profundidade das valetas, desvios de rochas e cruzamentos com vias, seguiram as recomendações da norma ABNT NBR 5422 e instruções internas da empresa.

Como já foi comentado, na época em que foi projetado o aterramento da linha não houve preocupação com o comprimento efetivo dos eletrodos, mas apenas em obter-se um valor de resistência de aterramento dentro do critério dos 30  $\Omega$ .

#### 4.4 Análise do Histórico de Desligamentos da Linha

É apresentada aqui uma análise dos desligamentos ocorridos na linha de setembro de 1998 a setembro de 2008. A atribuição da causa a descargas foi feita a partir de correlação entre os dados dos desligamentos obtidos de localizadores de falta instalados na linha em questão com os dados extraídos da central do sistema de localização e detecção de raios da empresa (LLS) (Vaisala, 2003), através do software FALLS (*Fault Analysis and Lightning Location System*).

O critério de correlação utilizado foi a ocorrência da descarga numa janela de mais ou menos um segundo do instante da falta na linha e a intercessão da elipse de confiança de 90% com a linha de transmissão. Essa elipse representa o erro de localização do sistema LLS (Dias, 2002).

O gráfico da Figura 4-6 apresenta a evolução do número total de desligamentos por ano na linha desde 1998. Percebe-se um aumento significativo do número de desligamentos da linha após 2003, principalmente daqueles com causa atribuída a descargas atmosféricas.

Já o gráfico da Figura 4-7 mostra os desligamentos registrados nos dez anos classificados por mês do ano. Pode-se notar uma tendência de ocorrência de desligamentos entre

os meses de novembro e março, que é o período caracterizado por maior ocorrência de chuvas e de incidência de descargas atmosféricas. Estão considerados no gráfico todos os desligamentos da LT por descargas e por outras causas.

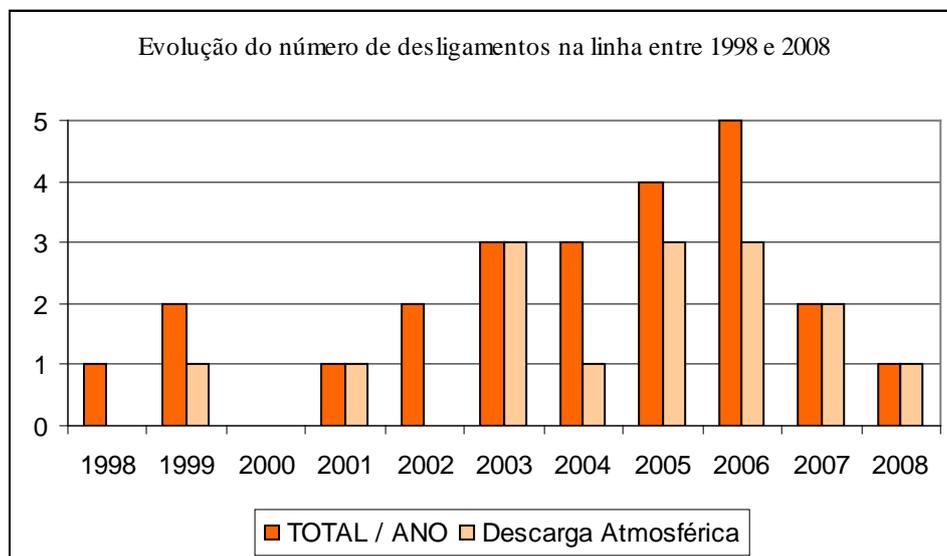


Figura 4-6 – Evolução do número de desligamentos da linha

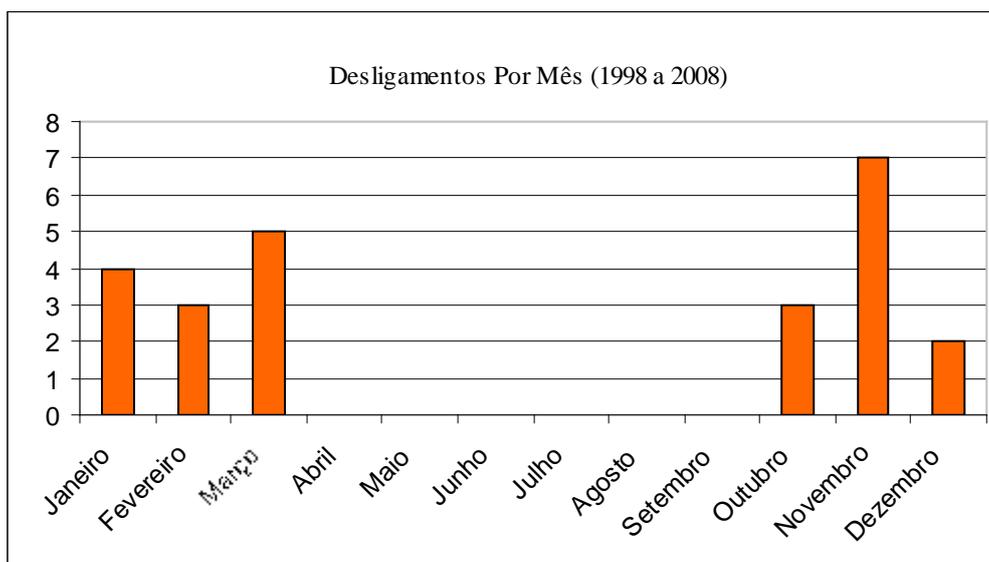


Figura 4-7 – Desligamentos totais por mês na linha de set./1998 a set./2008

A Figura 4-8 apresenta os dados de desligamentos de linha divididos por causa atribuída. Como observado, as descargas atmosféricas consistem na maior causa de desligamentos da linha, com uma média de 1,14 desligamentos por 100 km por ano. Apesar de a média ter valor aproximadamente na faixa esperada, há anos em que o índice ultrapassa 4 descargas/100 km/ano.

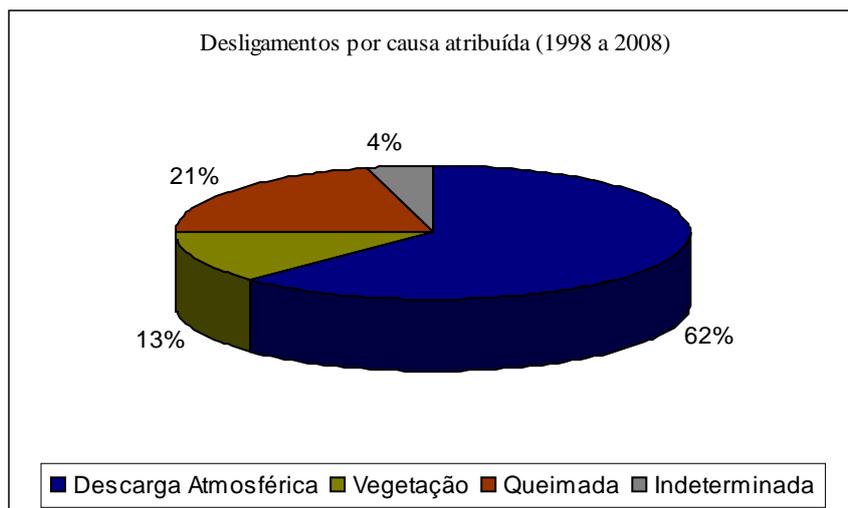


Figura 4-8 – Desligamentos por causa por ano entre set./1998 e set./2008

Com as informações de localização desses desligamentos na linha, verificou-se que os desligamentos estão associados aparentemente a alguns poucos trechos de linha, conforme esperado (Visacro, 2007a). A atuação concentrada nesses trechos, responsáveis pelos desligamentos, permite a otimização no estudo de melhoria. A Figura 4-9 abaixo mostra a localização dos desligamentos ao longo da linha.

O gráfico da Figura 4-9 mostra o envolvimento das fases nos desligamentos.

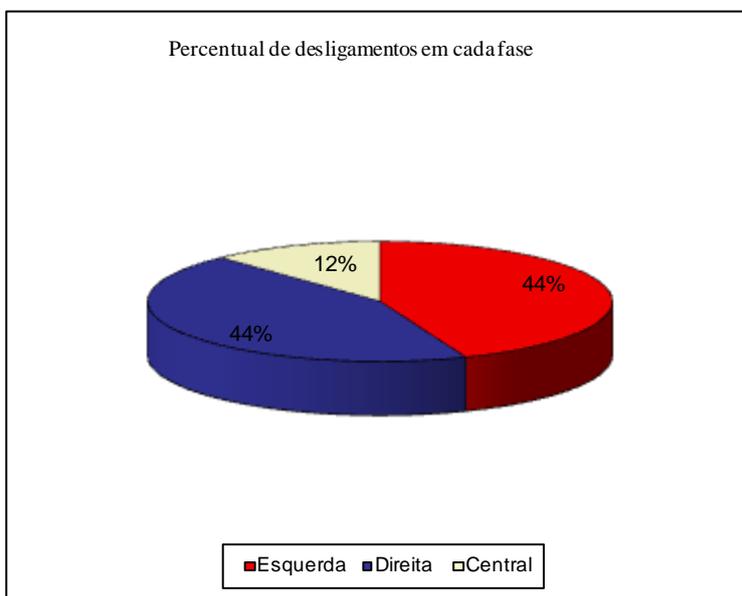


Figura 4-9 – Envolvimento das fases nos desligamentos ocorridos na linha.

A Tabela 4-2 apresenta os dados das ocorrências na linha, de 1998 a 2008. As ocorrências em negrito foram correlacionadas com descargas localizadas pelo LLS.

Data	Horário (GMT)	Fases Envolvidas	Posição da Fase	Localização
30/10/1998	17:26	Fase B com Terra	n/a	n/a
18/11/1999	20:27:13:448	Fase B com Terra	esquerda	Estrut. 188 a 208
<b>19/11/1999</b>	<b>21:16:41:513</b>	<b>Fase A com Terra</b>	<b>esquerda</b>	<b>Estrut. 100 a 120</b>
<b>16/12/2001</b>	<b>01:48:42:381</b>	<b>Fase B com Terra</b>	<b>direita</b>	<b>Estrut. 142 a 162</b>
8/10/2002	11:32	Fase B com Terra	central	Estrut. 304 a 324
12/10/2002	20:26:03:776	Fase A com Terra	esquerda	Estrut. 89 a 109
<b>22/1/2003</b>	<b>20:17:40:276</b>	<b>Fase C com Terra</b>	<b>direita</b>	<b>Estrut. 284 a 304</b>
<b>19/2/2003</b>	<b>20:52:32:196</b>	<b>Fase B com Terra</b>	<b>direita</b>	<b>Estrut. 111 a 131</b>
<b>2/11/2003</b>	<b>15:40:58:586</b>	<b>Fase B com Terra</b>	<b>direita</b>	<b>Estrut. 136 a 147</b>
17/3/2004	02:19:57:968	Fase B com Terra	esquerda	Estrut. 268 a 276
18/3/2004	21:04:41:350	Fase B com Terra	esquerda	Estrut. 257 a 267
<b>20/3/2004</b>	<b>22:05:59:416</b>	<b>Fase B com Terra</b>	<b>central</b>	<b>Estrut. 323 a 334</b>
<b>1/1/2005</b>	<b>16:20:27:267</b>	<b>Fase C com Terra</b>	<b>direita</b>	<b>Estrut. 264 a 286</b>
<b>17/1/2005</b>	<b>04:40:25:501</b>	<b>Fase C com Terra</b>	<b>direita</b>	<b>Estrut. 242 a 254</b>
8/11/2005	23:44:43:814	Fase A com Terra	central	Estrut. 188 a 197
<b>30/12/2005</b>	<b>18:43:46:363</b>	<b>Fase B com Terra</b>	<b>direita</b>	<b>Estrut. 136 a 147</b>
4/2/2006	12:35:59:149	Fase B com Terra	direita	Estrut. 132 A 142
4/2/2006	12:36:01:665	Fase B com Terra	direita	Estrut. 128 a 137
<b>5/3/2006</b>	<b>20:55:40:681</b>	<b>Fases B e C com Terra</b>	<b>esquerda direita</b>	<b>Estrut. 267 a 280</b>
<b>26/3/2006</b>	<b>18:21:12:532</b>	<b>Fase C com Terra</b>	<b>esquerda</b>	<b>Estrut. 352 a PTMQ</b>
<b>20/11/2006</b>	<b>19:45</b>	<b>Fase A e C com Terra</b>	<b>esquerda direita</b>	<b>Estrut. 320 a 332</b>
<b>3/11/2007</b>	<b>19:45:47:020</b>	<b>Fase B com Terra</b>	<b>esquerda</b>	<b>Estrut. 256 a 267</b>
<b>3/11/2007</b>	<b>19:45:47:715</b>	<b>Fase B com Terra</b>	<b>esquerda</b>	<b>Estrut. 244 a 264</b>
<b>10/1/2008</b>	<b>17:25:42:832</b>	<b>Fase C com Terra</b>	<b>esquerda</b>	<b>Estrut. 298 a 314</b>

Tabela 4-2 – Dados das ocorrências na linha de 1998 a 2008 (Horário com precisão de milissegundos).

#### 4.4 Medição de Resistências de Aterramento

A empresa responsável pela linha realizou medição das resistências de aterramento nos trechos que apresentaram maior reincidência de ocorrências (trechos entre as estruturas 128 e 147, 261 a 280, 320 a 332 e 352 a 360), com objetivo de verificar se havia nesses trechos valores elevados de resistência. Foram medidas as resistências de 62 torres do total de 302 torres da linha de transmissão.

As Tabelas 4-3, 4-4, 4-5 e 4-6 apresentam os resultados obtidos para cada trecho crítico. Em alguns casos, com resistências muito elevadas, foi também medida a resistividade do solo. A densidade de descargas atmosféricas foi obtida por meio de dados de descargas entre 2004 e 2008 na linha, obtidos do sistema SLT (Sistema de Localização de Tempestades - LLS da Cemig).

Torres	Resistência de aterramento ( $\Omega$ )	Resistividade do Solo ( $\Omega.m$ )	Comprimento do vão posterior (m)	Strokes/km <sup>2</sup> /ano
128	26,3	-	490	4,25
129	28,4	-	560	5,49
130	25,4	-	560	1,24
131	27,5	-	560	1,72
132	27,0	-	560	3,81
133	24,7	-	560	2,87
134	28,3	-	560	1,76
135	27,6	-	437	1,28

136	28,0	-	438	0
137	27,8	-	711	2,00
138	28,7	-	624	2,49
139	28,3	-	271	0
140	25,0	-	399	2,55
141	25,4	-	458	2,24
142	25,8	-	584	1,65
143	27,3	-	478	2,01
144	29,0	-	677	3,00
145	26,0	-	317	0
146	28,2	-	421	1,10
147	26,9	-	492	2,05

Tabela 4-3 – Características do trecho crítico das torres 128 a 147

Torres	Resistência de aterramento ( $\Omega$ )	Resistividade do Solo ( $\Omega.m$ )	Comprimento do vão posterior (m)	Strokes/km <sup>2</sup> /ano
261	1,9	-	550	2,79
262	37,0	1088	394	2,58
263	19,6	-	852	4,10
264	42,6	1268	542	2,79
265	12,3	-	598	0
266	19,3	-	1100	1,82
267	16,6	-	838	2,40
268	27,3	-	610	2,49
269	28,6	-	465	2,15
270	13,6	-	625	0,78
271	25,8	-	530	2,81
272	15,6	-	240	2,15
273	42,0	780	272	1,86
274	21,3	-	448	3,22
275	28,3	-	452	5,74
276	74,0	2548	1058	2,87
277	17,3	-	799	3,10
278	25,3	-	801	1,26
279	41,3	203	816	2,47
280	26,6	-	1186	1,66

Tabela 4-4 – Características do trecho crítico das torres 261 a 280

Torres	Resistência de aterramento ( $\Omega$ )	Resistividade do Solo ( $\Omega.m$ )	Comprimento do vão posterior (m)	Strokes/km <sup>2</sup> /ano
320	28,3	-	178	5,45
321	22,6	-	480	2,11
322	61,6	2317	348	1,37
323	63,0	1563	852	0,59
324	28,3	-	208	2,28
325	93,3	302	306	2,11
326	67,3	1081	808	0
327	111,6	1420	652	1,24
328	13,2	-	467	1,54

329	27,7	-	668	1,14
330	50,0	1247	490	1,45
331	20,0	-	842	1,73
332	35,2	732	907	1,65

Tabela 4-5 – Características do trecho crítico das torres 320 a 332

Torres	Resistência de aterramento ( $\Omega$ )	Resistividade do Solo ( $\Omega.m$ )	Comprimento do vão posterior (m)	Strokes/km <sup>2</sup> /ano
352	29,3	-	389	1,25
353	126,6	2875	688	3,66
354	37,0	2579	160	0
355	62,6	691	574	4,29
356	15,9	-	803	3,63
357	16,4	-	342	5,78
358	11,0	-	191	0
359	7,5	-	153	0
360	2,1	-	81	0

Tabela 4-6 – Características do trecho crítico das torres 352 a 360

Foram encontradas 14 estruturas com resistência de aterramento acima de 30 $\Omega$  e mais 29 torres com resistência entre 25 e 30  $\Omega$ . Os trechos críticos da linha foram simulados com o *software* Sigma Slp e estão apresentados no Capítulo 5.

#### 4.5 Impacto de Falhas na Linha de 500 KV

Para ilustrar o impacto sistêmico de uma contingência na linha de 500 kV aqui considerada, analisa-se uma falta real na linha ocorrida em 30/12/2005.

##### 4.5.1 Perspectiva do sistema elétrico

Foi utilizado o *software* SAPNET (Sistema de Análise de Perturbações) (Sousa et al., 2005) para obtenção dos dados de uma falta provocada por descarga atmosférica nesta linha. Esses dados foram transportados para o *software* Aspen Oneliner© de simulação de curto-circuito e em seguida foi observado o comportamento do módulo e fase das tensões e correntes nos barramentos da região atendida pela linha. A Figura 4-10 apresenta a situação pré-falta, as três fases com tensões e correntes aproximadamente equilibradas conforme destacado com o tracejado.

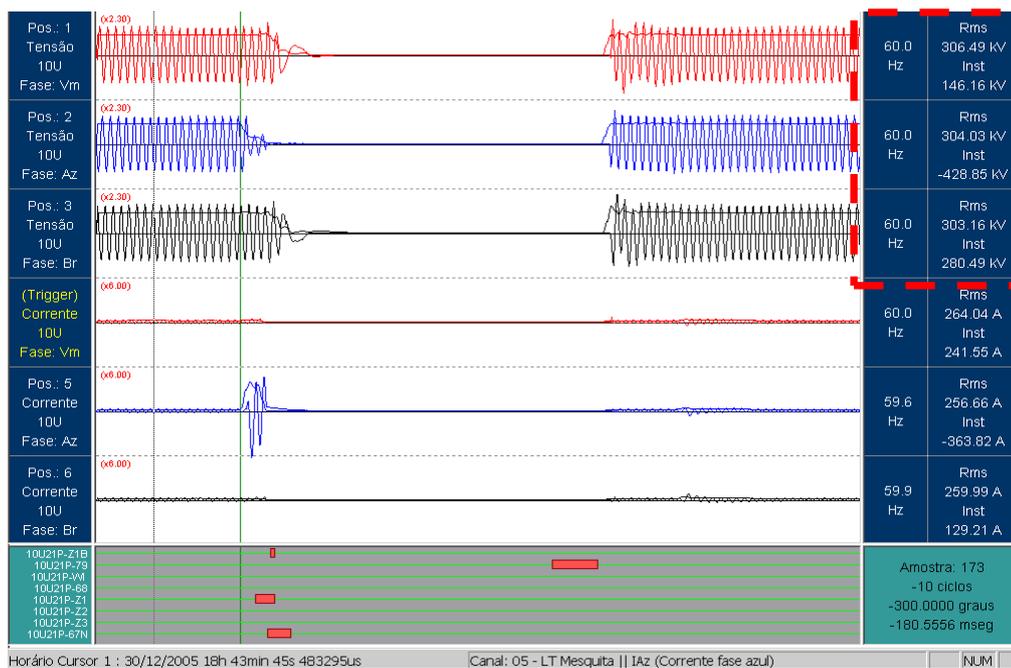


Figura 4-10 – Oscilografia com Tensões e Correntes da Fase C da Linha - Instante pré-falta

Na Figura 4-11, é ilustrado o instante de ocorrência do curto-circuito. Pode-se perceber o impacto da falta no barramento de 500 kV pelos valores de tensão e corrente destacados em tracejado e pelo gráfico. A tensão RMS sofre um afundamento de 40% da tensão nominal. A corrente da fase azul chega a 4.31kA. O detalhe na parte inferior mostra a localização da falta feita pelo software.

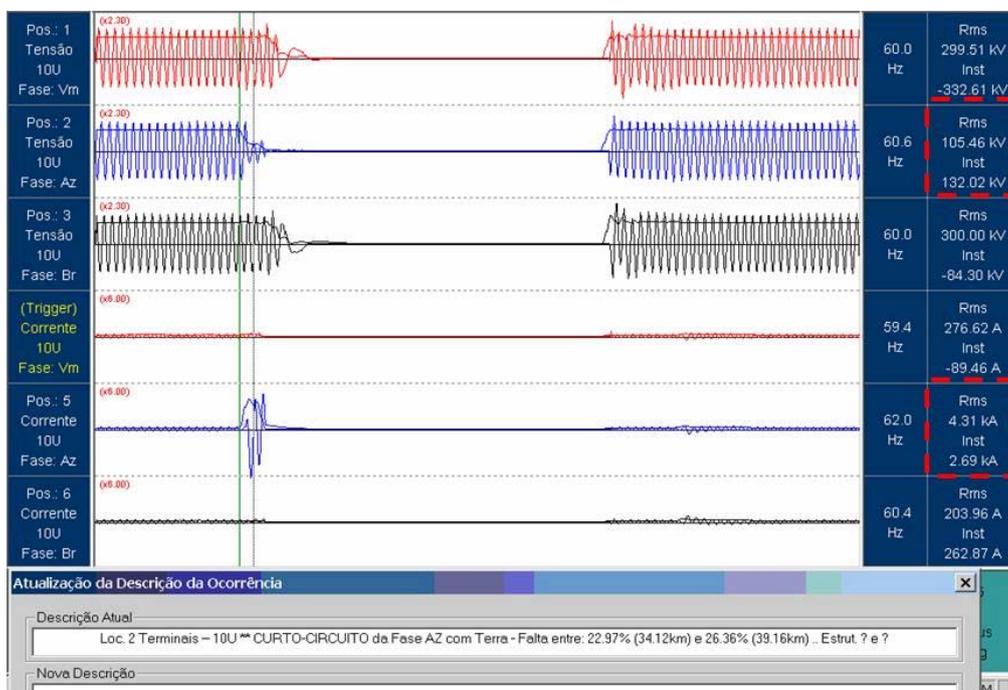


Figura 4-11 - Instante da ocorrência da falta em um desligamento por descarga atmosférica



Pode-se concluir, conforme mostrado nas Figuras 4-10 a 4-13, que o impacto do curto-circuito em uma linha de transmissão de 500 kV radial pode ser grande para uma determinada região atendida, mesmo para faltas transitórias de curta duração. Por este motivo, o desempenho dessas linhas de transmissão deve sempre ser monitorado.

#### 4.5.2 *Perspectiva econômica*

Conforme comentado anteriormente, do ponto de vista econômico, mesmo um desligamento mínimo não-programado de uma linha de transmissão pode causar prejuízos grandes para o cliente, sobretudo quando se trata de cliente industrial, cuja produção depende do fornecimento ininterrupto da energia.

Por outro lado, as concessionárias transmissoras recebem pela disponibilidade dos seus ativos. Tomando o caso de linhas de transmissão como exemplo, quando alguma linha está fora de serviço por algum motivo não programado, caso o período de indisponibilidade ultrapasse o padrão de duração de desligamento aceitável (valor limite), incidirá sobre a receita da linha, a Parcela Variável por Indisponibilidade (PV), que tem impacto direto na receita da linha de transmissão (ANEEL, 2007). A Tabela 4-7 mostra os padrões de duração e frequência de desligamentos aceitáveis para os diversos níveis de tensão e os fatores multiplicativos para desligamentos programados (Kp) e para outros tipos de desligamentos (Ko) que se aplicam sobre o tempo de indisponibilidade quando do cálculo da PV.

Função Transmissão	Família de Equipamento	Padrão de Duração de Desligamento		Padrão de Frequência de Outros Desligamentos (desl./ano)	Fator Ko		Fator Kp	
		Programado (hora/ano)	Outros (hora/ano)		Ano 1	Ano 2	Ano 1	Ano 2
LT	≤ 5km(*)	26,0	0,5	1	100	150	6,67	10
	>5km e ≤50Km(*)	26,0	1,4	1				
	>50km - 230kV	21,0	2,5	4				
	345kV	21,0	1,5	3				
	440kV	38,0	2,8	3				
	500kV	38,0	2,3	4				
	750kV	38,0	2,3	4				
	Cabo Isolado(*)	54,0	22,0	-	50	50	2,5	2,5

Tabela 4-7 – Padrões de duração e frequência de desligamentos aceitáveis e fatores Ko e Kp –(Adaptado de ANEEL Resolução Normativa N° 270 (2007))

O termo “Outros”, usado na tabela, se refere aos desligamentos não programados, cuja frequência máxima de desligamentos por ano aceitável é 4 desligamentos/ano para o caso 500 kV, sendo que o padrão de duração aceitável é de 2,3 h/ano. O gráfico mostrado na Figura 4-14 ilustra a evolução da PV na linha estudada, após ser ultrapassada a duração ou frequência de desligamento franqueada.

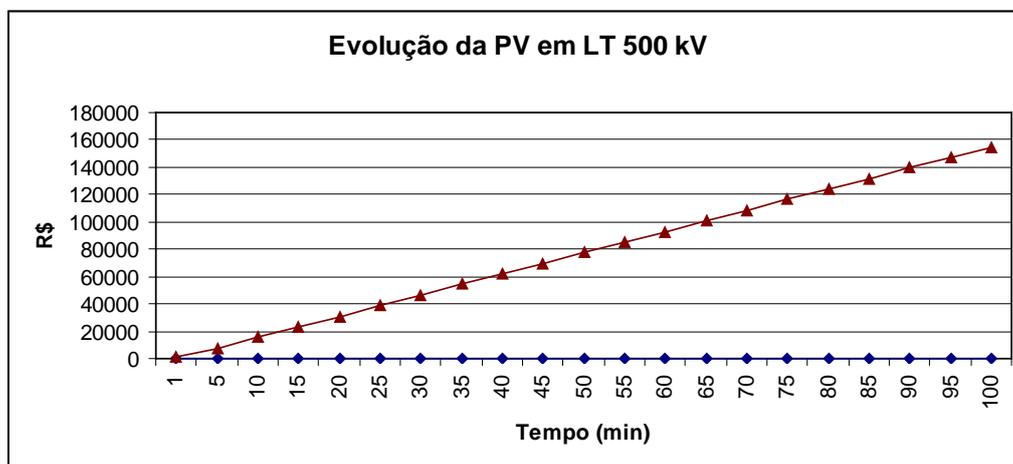


Figura 4-14 – Simulação da evolução da PV em uma linha de 500 kV

Cada minuto com cobrança de PV, para o caso da linha acima ilustrada representa R\$ 1550,58. Este valor pode parecer pouco significativo para uma empresa. Mas para uma cobrança que irá incidir em uma janela de doze meses (período no qual é computada a Parcela Variável das Transmissoras no cálculo da Receita Anual Permitida dos Ativos) ao longo dos anos pode gerar uma grande perda de receita, pois os minutos contabilizados para cálculo da PV são cumulativos sendo distinguidos apenas pelo fato de serem de desligamento programado ou não.

Tal aspecto denota como é importante comparar sempre a projeção dos prejuízos provocados pela PV com o custo das melhorias propostas, pois prevenir desligamentos contribui não apenas para preservar a qualidade da energia para o consumidor como também para se garantir a receita da concessionária.

# 5 Análise da Linha de 500 KV com o Software SIGMA SLP

## 5.1 Introdução

Neste capítulo é realizada uma análise de comportamento dos trechos críticos da Linha 500 kV usada como exemplo neste trabalho, considerados de maior influência no seu desempenho frente a descargas atmosféricas. Para isso é utilizado o aplicativo computacional SIGMA SLP. Na análise são variados alguns parâmetros da linha para determinar sua influência na taxa de desligamentos.

## 5.2 Considerações Preliminares do SIGMA SLP

A seguir é apresentada uma visão geral do aplicativo computacional SIGMA SLP, cujos detalhes particulares constam na referência (Sadovic et al, 2003). O aplicativo foi escolhido para avaliação neste estudo, por permitir uma abordagem bem mais elaborada na simulação e permitir maior versatilidade que o aplicativo FLASH (IEEE, 1997), que é um dos programas mais utilizados para avaliação de desempenho frente a descargas.

### 5.2.1 Descrição Geral

Algumas das principais características do SIGMA SLP são: utilização de um método estatístico de Monte Carlo para simulação de incidência de descargas ou resposta da linha frente a uma única descarga (*single stroke study*); utilização do modelo eletrogeométrico para determinação da taxa de incidência na linha; representação linear ou não-linear da resistência de aterramento; possibilidade de representação da forma de onda da corrente da descarga com frente linear ou côncava; utilização do método de ondas viajantes para cálculo dos transitórios eletromagnéticos. Esta última é uma das diferenças mais marcantes do SIGMA para o FLASH.

Neste *software*, ainda é possível modelar o desempenho de linhas com ou sem cabos de blindagem, considerar níveis de isolamentos diferentes para torres e simular a utilização de pára-raios em paralelo com os isoladores da linha, em várias configurações.

O aplicativo considera apenas a ocorrência de *backflashovers* e *flashovers* nas torres da linha e não considera as ocorrências de ruptura a meio de vão. O desempenho da linha é dado pela soma das taxas BFR (*backflashover rate*) e SFR (*shielding failure rate*) por 100km por ano.

O modelo de *flashover* utilizado pelo SIGMA é o modelo de progressão do líder, representado por:

$$V_l = 170d \left[ \frac{u(t)}{d - l_l} - E_0 \right] e^{0,0015 \frac{u(t)}{d}} \quad \text{Equação 5-1}$$

Onde -  $V_l$  é a velocidade do líder,  $d$  a distância do gap,  $l_l$  - comprimento do líder,  $u(t)$  a tensão aplicada e  $E_0$  o gradiente de tensão (520 kV/m).

A tensão da linha pode influenciar na ocorrência de desligamentos. Esta influência é considerada no cálculo da tensão resultante a qual a cadeia está submetida. O Efeito Corona não é considerado pelo SIGMA SLP.

### 5.2.2 Modelagem da Linha de Transmissão

A Figura 5-1 ilustra a tela de modelagem das características da linha onde devem ser especificados os seguintes dados:

- a) comprimento da linha (km);
- b) vão médio (m);
- c) impedância de surto da torre ( $\Omega$ );
- d) altura da torre (m);
- e) número de circuitos na torre e cabos de blindagem;
- f) coordenada horizontal do condutor (m);
- g) altura do condutor na torre (m);
- h) raio do condutor (mm);
- i) número de condutores no feixe;
- j) diâmetro do feixe (m);
- k) flecha no meio do vão (m);

- l) fase;
- m) tensão da linha [rms, fase-fase];
- n) Nós da torre no qual *flashovers* podem acontecer.

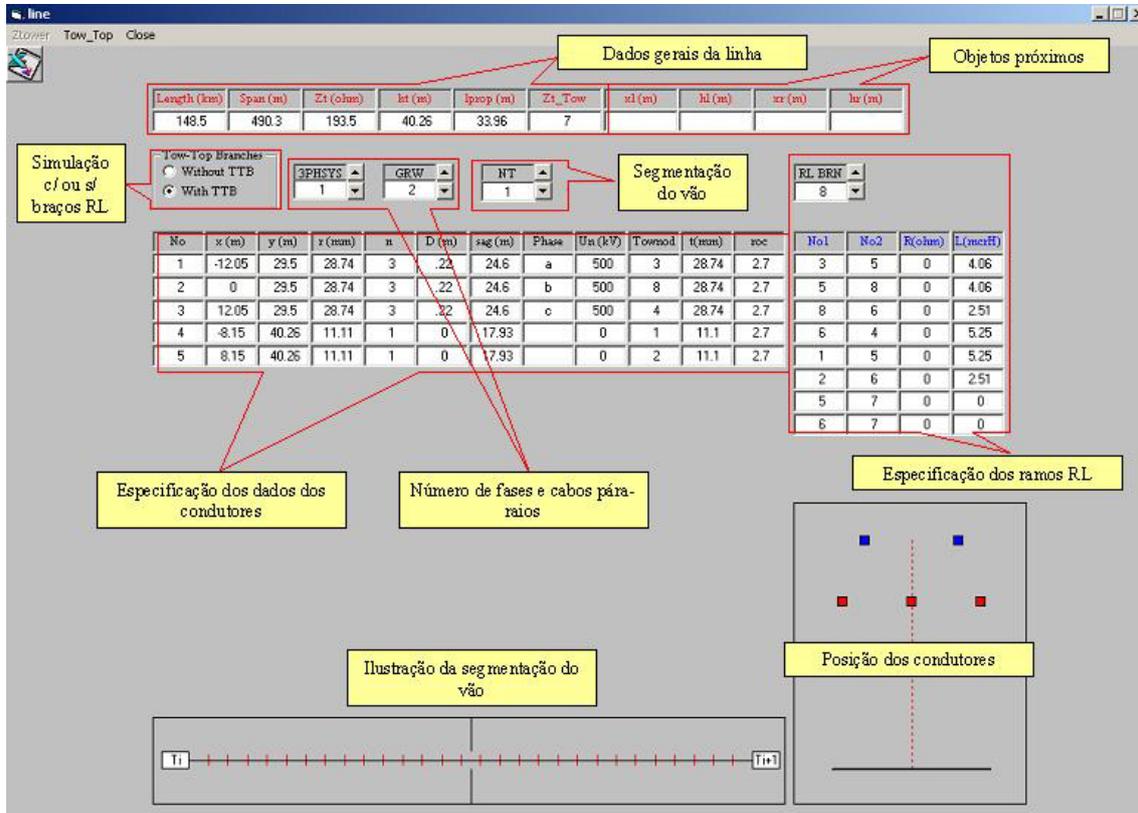


Figura 5-1 – Especificação de dados da linha de transmissão no SIGMA SLP

Nesta tela também pode ser indicada a presença de objetos próximos a linha que possam interferir no modelo eletrogeométrico, o número de circuitos na torre e o modelo de representação da torre. Nas simulações de transitórios eletromagnéticos dois modelos podem ser usados para representar a torre (Figura 5-2):

- a) Modelo de propagação simples: utiliza a impedância de surto igual a impedância de surto da torre, e caminho de propagação igual a altura da torre.
- b) Combinação do modelo simples e braços RL (resistência – indutância) para modelagem dos transitórios no topo da torre.

Se for usado o modelo com ramos RL no topo da torre, pode-se utilizar a opção “*Tow\_top*” para especificação das características do topo da torre graficamente, conforme Figura 5-3. A opção *Ztower*, dentro do menu “*Tow\_top*” pode-ser utilizada para cálculo da impedância de surto para a torre. A fórmula utilizada neste cálculo para uma torre tipo “cara-de-gato” como a ilustrada é:

$$Z_T = 60 \left[ \ln \left( \sqrt{2} \frac{2h}{r} \right) - 1 \right]$$

Equação 5-2

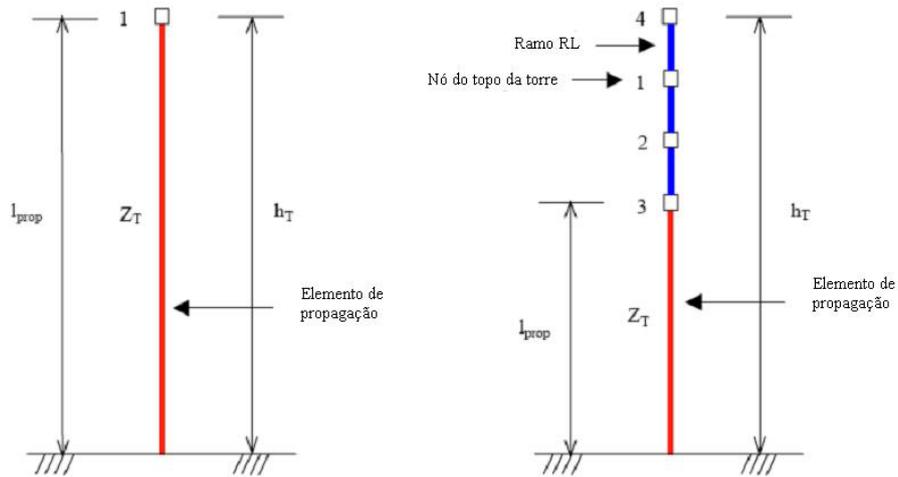


Figura 5-2 – Modelos de representação da torre

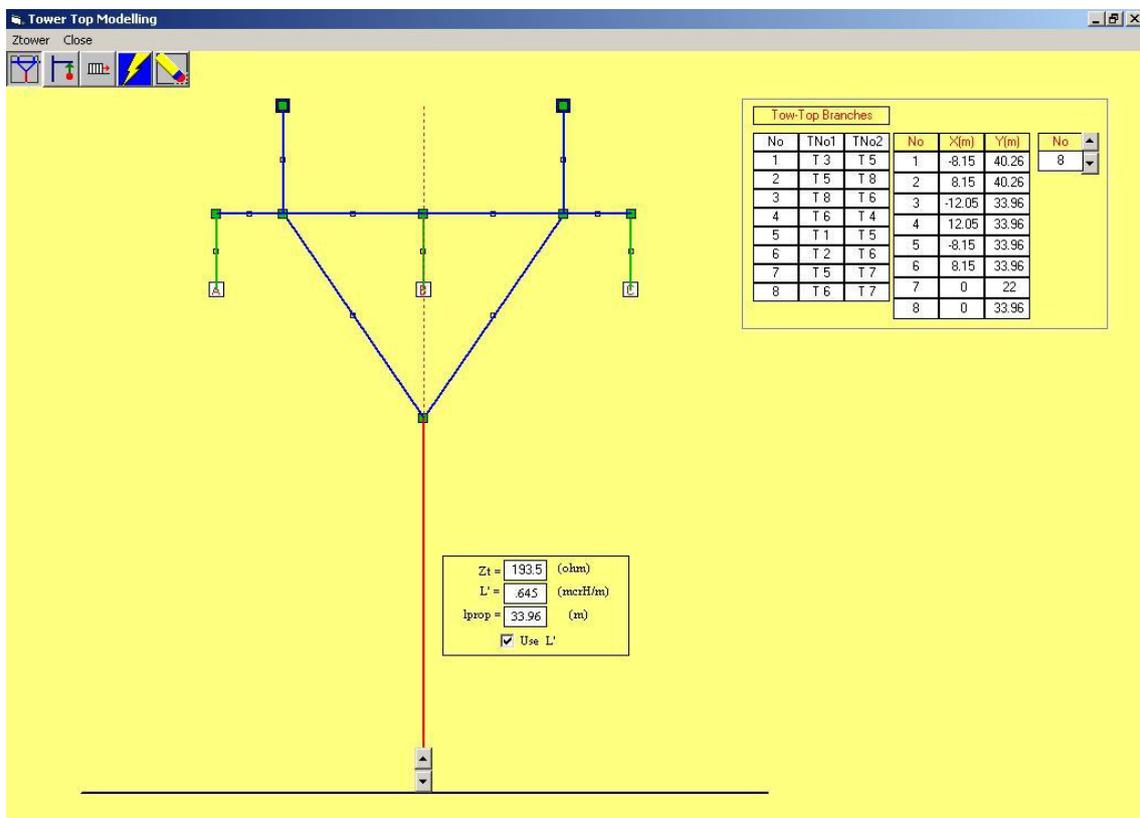


Figura 5-3 – Desenho do topo da torre

A seção simulada da linha é composta por uma série de vãos. Nas simulações estatísticas, o número de torres a ser utilizado depende das características da linha. Para uma linha com cabos de blindagem e isolamento uniforme ao longo da linha é sugerido pelo manual do *software* a seguinte regra:

1. Se a linha não tiver pára-raios é suficiente utilizar quatro a seis torres;
2. Se a linha tiver pára-raios instalados e houver interesse apenas no desempenho, utilizar quatro a seis torres;
3. Se houver interesse na corrente do pára-raios ou nas distribuições de energia é necessário utilizar dez ou mais torres.

Nas terminações da seção da linha, são conectadas matrizes de impedância de surto correspondentes aos condutores da linha para evitar reflexões. A Figura 5-4 mostra a tela de especificação das características da seção da linha a ser simulada.

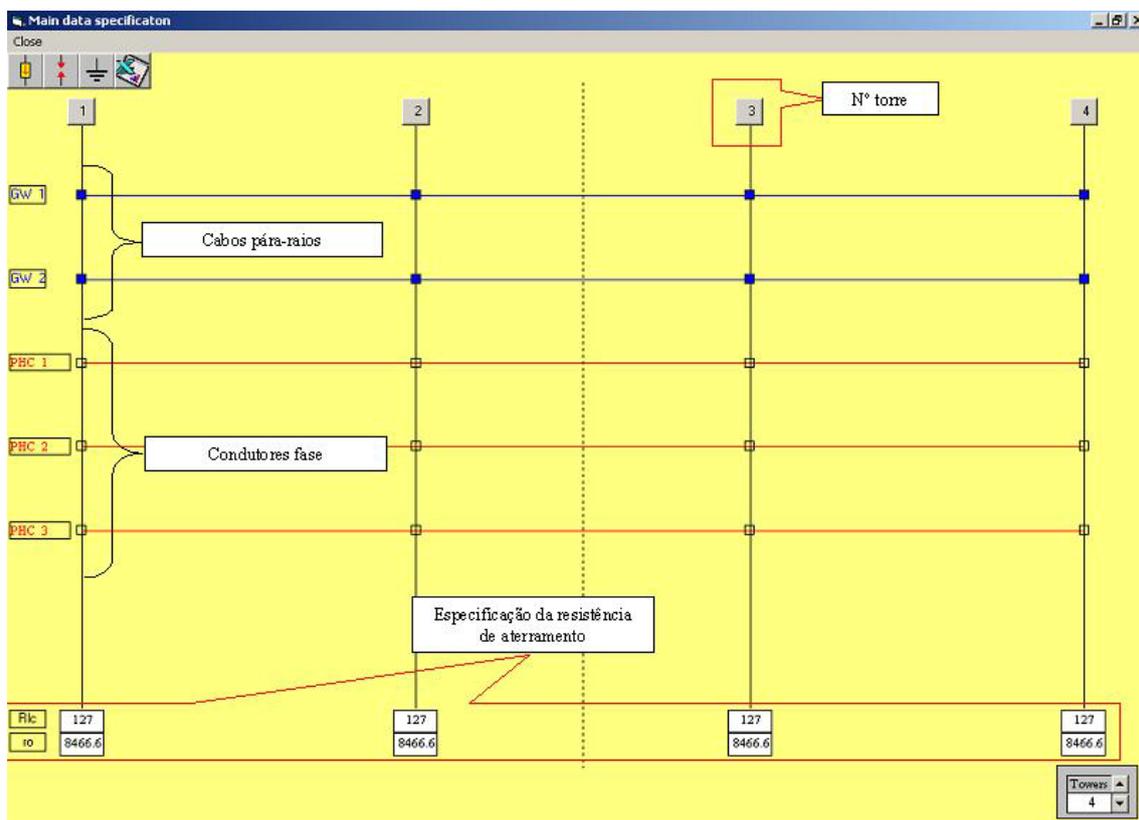


Figura 5-4 – Especificação da seção da linha a ser simulada

Nesta tela é possível especificar as características de isolamento de cada torre, definindo a tensão disruptiva crítica, e as características de eventuais pára-raios e de aterramento.

Os modelos de resistência de aterramento disponíveis são de resistência constante, de ionização do solo e de contrapeso com parâmetros dependentes da frequência.

O modelo de resistência constante é utilizado quando a resistividade do solo é considerada zero, então o aplicativo considera a resistência como um elemento concentrado.

O modelo de ionização do solo utilizado no aplicativo é definido pela resistência para correntes baixas e pela resistividade do solo e as seguintes equações são utilizadas no cálculo:

$$R_i = \frac{R_{lc}}{\sqrt{1 + \left(\frac{I}{I_g}\right)^2}} \quad \text{Equação 5-3}$$

$$I_g = \frac{E_g \rho}{2\pi R_{lc}^2} \quad \text{Equação 5-4}$$

onde:

$R_{lc}$  - resistência de aterramento de baixa corrente ( $\Omega$ )

$R_i$  - resistência impulsiva de aterramento ( $\Omega$ )

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

$I$  - corrente impulsiva (kA)

$I_g$  - corrente limite de ionização do solo (kA)

$E_g$  - campo elétrico crítico para ionização do solo [ $E_g = 400$  (kV/m)]

O modelo de contrapesos com parâmetros dependentes com a frequência é definido pela seguinte expressão:

$$Z(t) = R_0 + (Z_i - R_0)e^{-299,8t/2l} \quad \text{Equação 5-5}$$

onde:

$$R_0 = \frac{\rho}{\pi l_u} \left[ \ln\left(\frac{2l_u}{\sqrt{4rh}}\right) - 1 \right] \quad \text{Equação 5-6}$$

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

$l_u$  - comprimento total do contrapeso (m) ( $l_u = N.l$  onde N é o número de contrapesos)

r - raio do condutor (m)

h - profundidade do contrapeso (m)

A impedância de surto inicial do contrapeso é calculada por meio das seguintes expressões:

$$Z_i = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{Equação 5-7}$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ \ln\left(\frac{2l}{\sqrt{2hr}}\right) - 1 \right] \quad \text{Equação 5-8}$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{2l}{\sqrt{2hr}}\right) - 1} \quad \text{Equação 5-9}$$

Onde:

L – indutância do contrapeso (H)

C – capacitância do contrapeso (F)

A Figura 5-5 apresenta a tela de especificação e cálculo do contrapeso.

R (ohm)	Zi	Zi/N
15.1	124.85	31.21

Figura 5-5 – Tela de especificação do modelo por contrapesos

### 5.2.3 Simulação de Incidência de Descargas Atmosféricas

O modelo eletrogeométrico é utilizado pelo SIGMA SLP para determinar o ponto de ocorrência de descargas na linha e pode ser configurado pelo menu de opções do aplicativo. Podem ser definidas características como:

- Parâmetros da função distribuição de *strokes*. Dois modelos do Cigré (WG 33.01, 1991) estão disponíveis, um terceiro pode ser definido pelo usuário;
- o ângulo de aproximação do líder (vertical, em ângulo);
- distância de conexão do canal da descarga;
- distância de incidência da descarga no solo;
- número de amostras do modelo eletrogeométrico geradas pelo algoritmo de Monte-Carlo;
- fator de incidência da descarga na torre;
- unidades métricas;
- freqüência da linha;

A Figura 5-6 apresenta as opções de configuração.

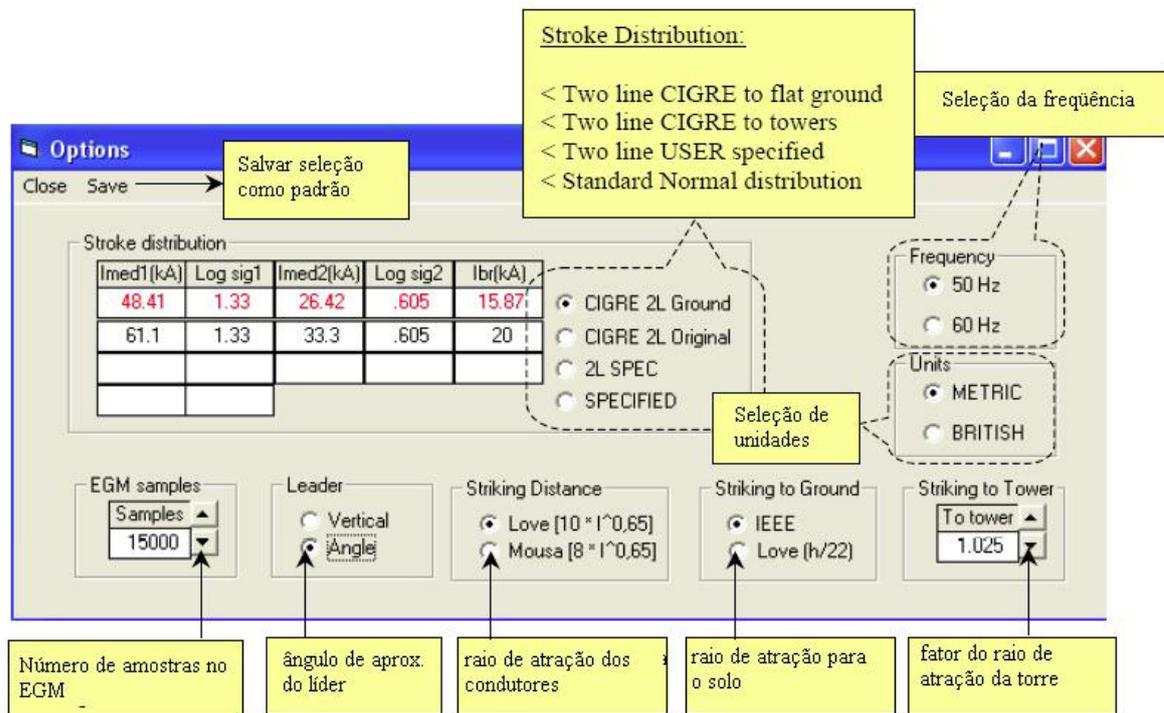


Figura 5-6 – Configurações do SIGMA SLP

O SIGMA SLP oferece duas opções de simulação para incidência de descargas atmosféricas na linha.

- “Single stroke study” (Estudo de descarga única)

Neste caso é necessário especificar o ponto da seção simulada no qual incidirá a descarga. Devem ainda ser determinados a amplitude da corrente (kA), o tempo de frente da onda da descarga ( $\mu\text{s}$ ), o tempo de cauda ( $\mu\text{s}$ ), o formato da onda (linear ou côncava) e o ângulo da tensão da fase A. O aplicativo então irá determinar se o *stroke* irá provocar desligamento da linha.

- Estudo estatístico

Para realizar o estudo estatístico é necessário determinar a densidade de descargas atmosféricas para o solo (Gfd) ou dias de tempestade por ano (TSD) e número de *strokes* a ser considerado no estudo. O aplicativo então, com base no modelo eletrogeométrico simulado, irá determinar para cada *stroke* a posição de incidência, fase em que ocorrerá *flashover* (se houver), número de *flashovers* para o estudo atual, taxa de desligamentos da linha para o estudo atual e corrente ou energia máxima do pára-raios (se houver).

#### **5.2.4 Estudos Múltiplos**

A opção “*Multiple Studies*” é utilizada para realizar estudo no trecho da linha modelado pelo usuário, com diferentes valores para quaisquer das seguintes características:

- resistência de aterramento.
- dados de isolamento.
- configuração de instalação de pára-raios.

Com esta opção é possível obter, através de diversas simulações, um valor aproximado para a taxa de desligamentos/100km/ano da linha em toda sua extensão, fornecendo ao aplicativo todas as resistências de aterramento da mesma e os respectivos comprimentos dos vãos, através de um arquivo em Excel.

Nos estudos múltiplos, o programa também fornece a possibilidade de dividir a linha em seções para que cada uma destas tenha uma densidade de *strokes/km<sup>2</sup>/ano* específica.

### **5.3 Análise dos Trechos Críticos da Linha**

Os trechos considerados críticos da linha de 500 kV em estudo, foram analisados com o SIGMA SLP. Primeiramente foi feita uma análise de sensibilidade por trecho, calculando a taxa

---

de desligamentos da linha pela média ponderada das taxas de desligamento por trecho. Em seguida é feita a análise com os Estudos Múltiplos.

### 5.3.1 Por trechos

Para realizar análise por trecho foram feitas as seguintes considerações:

- Foram simulados os trechos compreendidos entre as estruturas 261 – 280, 320 – 332 e 352 – 360. O trecho entre as estruturas 128 – 147 não foi simulado, pois não apresentou nenhuma resistência com valor elevado.
  - Os trechos simulados foram divididos em seções de quatro ou cinco estruturas, conforme a recomendação do aplicativo.
  - Foram feitas as simulações considerando o valor da resistividade do solo, no modelo de ionização utilizado pelo aplicativo, e também com valor de resistividade nula, assumindo valor de 65% da resistência de aterramento (Soares et al., 1997) como valor da impedância impulsiva de aterramento, pois o aplicativo desconsidera a resistividade no cálculo quando o valor zero é atribuído à resistividade, considerando somente o valor da impedância impulsiva. Foram considerados três valores de resistividade na análise:
    1. Média da resistividade do solo das torres críticas no trecho em estudo.
    2. Média das resistividades das torres críticas em todos os trechos.
    3. Maior resistividade medida em uma torre compreendida no trecho.
  - Foram utilizados os seguintes valores de densidade de descargas (*strokes/km<sup>2</sup>/ano*) na análise:
    1. Valor real medido.
    2. Média dos três maiores valores no mapa de Minas Gerais (Figura 3-4) na região em que a linha está inserida.
    3. Valor máximo destacado nesse mapa na região da linha.
  - Nas simulações, ao variar a resistividade do solo, a densidade de descargas permaneceu constante no valor real. Ao variar a densidade de descargas, a resistividade do solo permaneceu constante na média da resistividade das torres críticas. Os outros parâmetros ficaram constantes durante o estudo em cada seção do trecho.
  - Para cada simulação foi feita a redução dos valores das resistências de aterramento para verificar a melhoria no desempenho correspondente, da seguinte forma:
-

1. Somente das torres com  $R_{att} > 30 \Omega$  (caso a).
2. Somente das torres com  $R_{att} > 60 \Omega$  (caso b).
3. Somente das torres com  $R_{att} > 90 \Omega$  (caso c).

A linha da tabela que está destacada em cor diferente corresponde aos resultados com base nos dados reais da linha.

### 5.3.1.1 Seção da torre 261 a 265

As observações realizadas para esta primeira seção da linha são pertinentes para as seções seguintes que foram simuladas. Após a apresentação do resultado de todas as seções é apresentada uma Tabela com o resumo dos resultados para todos os trechos críticos.

#### Dados

- Vão médio: 585m.
- *Strokes*/km<sup>2</sup>/ano: 4,4.

A Tabela 5-1 abaixo apresenta os resultados das simulações variando-se a densidade de descargas.

<i>Strokes</i> /km <sup>2</sup> /ano	<i>Backflashovers</i>	Falhas de blindagem	Desligamentos/100km /ano
4,4	19	0	0,65
5,0	19	0	0,74
7,0	19	0	1,04

Tabela 5-1 Resultados variando-se a densidade de descargas atmosféricas

O aplicativo considera o número de *backflashovers* a partir do número total de descargas utilizado no modelo estatístico de Monte Carlo. Por esse motivo o número de *backflashovers* em cada simulação não variou, mas a taxa de desligamentos variou de acordo com o aumento da densidade de descargas, pois esta é um fator multiplicador no cálculo da taxa.

A Tabela 5-2 apresenta os resultados variando-se a resistividade do solo. Pelo modelo de ionização do solo, quanto menor a resistividade do solo, menor é a probabilidade de ocorrência de desligamentos por descarga. Neste modelo ocorre a redução da corrente crítica para ocorrência do fenômeno, contribuindo para a redução da impedância impulsiva de aterramento. Pode-se ver pelos resultados que quanto menor a resistividade do solo, menor o número de desligamentos, confirmando esta hipótese.

<b>Resistividade do solo(<math>\Omega</math>)</b>	<b><i>Backflashovers</i></b>	<b>Falhas de blindagem</b>	<b>Desligamentos/100km /ano</b>
0 (65% Ratt)	12	1	0,45
1177	19	0	0,65
1380	27	0	0,93
2550	36	0	1,24

Tabela 5-2 Resultados variando-se a resistividade do solo

No entanto, para aterramentos extensos como normalmente são os aterramentos de linhas de transmissão, o fenômeno de ionização do solo não deve ser tão relevante. Trabalhos desenvolvidos (Visacro e Soares, 1994) mostram que para comprimentos reduzidos de cabos contrapeso, a redução da resistência ( $R_i$ ) fica inferior a 10%.

### 5.3.1.2 Seção da torre 265 a 269

#### Dados:

- Vão médio: 786m.
- *Strokes*/km<sup>2</sup>/ano: 3,0.

A Tabela 5-3 apresenta os resultados das simulações variando-se a densidade de descargas.

<b><i>Strokes</i>/km<sup>2</sup>/ano</b>	<b><i>Backflashovers</i></b>	<b>Falhas de blindagem</b>	<b>Desligamentos/100km /ano</b>
3,0	9	0	0,21
5,0	9	0	0,35
7,0	9	0	0,49

Tabela 5-3 Resultados variando-se a densidade de descargas atmosféricas

A Tabela 5-4 apresenta os resultados variando-se a resistividade do solo.

<b>Resistividade do solo(<math>\Omega</math>)</b>	<b><i>Backflashovers</i></b>	<b>Falhas de blindagem</b>	<b>Desligamentos/100km /ano</b>
0 (65% Ratt)	4	0	0,12
1177	9	0	0,21
1380	11	0	0,25
2550	20	0	0,47

Tabela 5-4 Resultados variando-se a resistividade do solo

### 5.3.1.3 Seção da torre 269 a 273

Dados:

- Vão médio: 465m.
- *Strokes*/km<sup>2</sup>/ano: 2,6.

A Tabela 5-5 apresenta os resultados das simulações variando-se a densidade de descargas.

<i>Strokes</i> /km <sup>2</sup> /ano	<i>Backflashovers</i>	Falhas de blindagem	Desligamentos/100km /ano
2,6	7	0	0,14
5,0	7	0	0,27
7,0	7	0	0,38

Tabela 5-5 Resultados variando-se a densidade de descargas atmosféricas

A Tabela 5-6 apresenta os resultados variando-se a resistividade do solo.

Resistividade do solo( $\Omega$ .m)	<i>Backflashovers</i>	Falhas de blindagem	Desligamentos/100km /ano
0 (65% Ratt)	3	0	0,06
1177	7	0	0,14
1380	9	0	0,18
2550	15	0	0,31

Tabela 5-6 Resultados variando-se a resistividade do solo

### 5.3.1.4 Seção da torre 273 a 277

Dados:

- Vão médio: 558m.
- *Strokes*/km<sup>2</sup>/ano: 2,6.

A Tabela 5-7 apresenta os resultados das simulações variando-se a densidade de descargas.

<i>Strokes</i> /km <sup>2</sup> /ano	<i>Backflashovers</i>	Falhas de blindagem	Desligamentos/100km /ano
2,6	29	0	0,60
5,0	29	0	1,16
7,0	29	0	1,63

Tabela 5-7 Resultados variando-se a densidade de descargas atmosféricas

A Tabela 5-8 apresenta os resultados variando-se a resistividade do solo.

<b>Resistividade do solo(<math>\Omega</math>)</b>	<b><i>Backflashovers</i></b>	<b>Falhas de blindagem</b>	<b>Desligamentos/100km /ano</b>
0 (65% Ratt)	27	0	0,80
1177	29	0	0,60
1380	36	0	0,75
2550	55	0	1,15

Tabela 5-8 Resultados variando-se a resistividade do solo

### 5.3.1.5 Seção da torre 277 a 280

Dados:

- Vão médio: 901m
- *Strokes*/km<sup>2</sup>/ano: 2,4

A Tabela 5-9 apresenta os resultados das simulações variando-se a densidade de descargas.

<b><i>Strokes</i>/km<sup>2</sup>/ano</b>	<b><i>Backflashovers</i></b>	<b>Falhas de blindagem</b>	<b>Desligamentos/100km /ano</b>
2,4	32	1	0,63
5,0	32	1	1,32
7,0	32	1	1,85

Tabela 5-9 Resultados variando-se a densidade de descargas atmosféricas

A Tabela 5-10 apresenta os resultados variando-se a resistividade do solo.

<b>Resistividade do solo(<math>\Omega</math>)</b>	<b><i>Backflashovers</i></b>	<b>Falhas de blindagem</b>	<b>Desligamentos/100km /ano</b>
0 (65% Ratt)	32	1	0,51
1177	32	1	0,63
1380	39	1	0,75
2550	65	1	1,26

Tabela 5-10 Resultados variando-se a resistividade do solo

### 5.3.1.6 Seção da torre 320 a 324

Dados:

- Vão médio: 465m.
- *Strokes*/km<sup>2</sup>/ano: 2,4.

A Tabela 5-11 apresenta os resultados das simulações variando-se a densidade de descargas.

<i>Strokes/km<sup>2</sup>/ano</i>	<i>Backflashovers</i>	<i>Falhas de blindagem</i>	<i>Desligamentos/100km /ano</i>
2,4	37	0	0,69
5,0	37	0	1,45
7,0	37	0	2,03

Tabela 5-11 Resultados variando-se a densidade de descargas atmosféricas

A Tabela 5-12 apresenta os resultados variando-se a resistividade do solo.

<i>Resistividade do solo(<math>\Omega</math>)</i>	<i>Backflashovers</i>	<i>Falhas de blindagem</i>	<i>Desligamentos/100km /ano</i>
0 (60% Ratt)	42	0	0,82
1237	37	0	0,69
1380	42	0	0,79
2317	66	0	1,24

Tabela 5-12 Resultados variando-se a resistividade do solo

### 5.3.1.7 Seção da torre 324 a 328

#### Dados:

- Vão médio: 494m.
- *Strokes/km<sup>2</sup>/ano*: 2,0.

A Tabela 5-13 apresenta os resultados das simulações variando-se a densidade de descargas.

<i>Strokes/km<sup>2</sup>/ano</i>	<i>Backflashovers</i>	<i>Falhas de blindagem</i>	<i>Desligamentos/100km /ano</i>
2,0	74	0	1,16
5,0	74	0	2,90
7,0	74	0	4,07

Tabela 5-13 Resultados variando-se a densidade de descargas atmosféricas

A Tabela 5-14 apresenta os resultados variando-se a resistividade do solo.

<i>Resistividade do solo(<math>\Omega</math>)</i>	<i>Backflashovers</i>	<i>Falhas de blindagem</i>	<i>Desligamentos/100km /ano</i>
0 (65% Ratt)	174	0	2,82
1237	74	0	1,16
1380	83	0	1,30
2317	143	0	2,24

Tabela 5-14 Resultados variando-se a resistividade do solo

### 5.3.1.8 Seção da torre 328 a 332

Dados:

- Vão médio: 617m.
- *Strokes*/km<sup>2</sup>/ano: 1,8.

A Tabela 5-15 apresenta os resultados das simulações variando-se a densidade de descargas.

<i>Strokes</i> /km <sup>2</sup> /ano	<i>Backflashovers</i>	Falhas de blindagem	Desligamentos/100km /ano
1,8	10	0	0,14
5,0	10	0	0,39
7,0	10	0	0,55

Tabela 5-15 Resultados variando-se a densidade de descargas atmosféricas

A Tabela 5-16 apresenta os resultados variando-se a resistividade do solo.

Resistividade do solo( $\Omega$ )	<i>Backflashovers</i>	Falhas de blindagem	Desligamentos/100km /ano
0 (65% Ratt)	17	1	0,26
1237	10	0	0,14
1380	11	0	0,15
2317	25	0	0,35

Tabela 5-16 Resultados variando-se a resistividade do solo

### 5.3.1.9 Seção da torre 352 a 356

Dados:

- Vão médio: 453m.
- *Strokes*/km<sup>2</sup>/ano: 2,7.

A Tabela 5-17 apresenta os resultados das simulações variando-se a densidade de descargas.

<i>Strokes</i> /km <sup>2</sup> /ano	<i>Backflashovers</i>	Falhas de blindagem	Desligamentos/100km /ano
2,7	62	0	1,32
5,0	62	0	2,45
7,0	62	0	3,43

Tabela 5-17 Resultados variando-se a densidade de descargas atmosféricas

A Tabela 5-18 apresenta os resultados variando-se a resistividade do solo.

Resistividade do solo( $\Omega$ )	<i>Backflashovers</i>	Falhas de blindagem	Desligamentos/100km /ano
0 (65% Ratt)	141	0	3,03
1380	25	0	0,53
2048	62	0	1,32
2875	106	0	2,26

Tabela 5-18 Resultados variando-se a resistividade do solo

### 5.3.1.9 Seção da torre 356 a 360

Dados:

- Vão médio: 396m.
- *Strokes*/km<sup>2</sup>/ano: 3,5.

A Tabela 5-19 apresenta os resultados das simulações variando-se a densidade de descargas.

<i>Strokes</i> /km <sup>2</sup> /ano	<i>Backflashovers</i>	Falhas de blindagem	Desligamentos/100km /ano
3,5	0	0	0,00
5,0	0	0	0,00
7,0	0	0	0,00

Tabela 5-19 Resultados variando-se a densidade de descargas atmosféricas

A Tabela 5-20 apresenta os resultados variando-se a resistividade do solo.

Resistividade do solo( $\Omega$ )	<i>Backflashovers</i>	Falhas de blindagem	Desligamentos/100km /ano
0 (65% Ratt)	0	0	0,00
1380	0	0	0,00
2048	0	0	0,00
2875	0	0	0,00

Tabela 5-20 Resultados variando-se a resistividade do solo

### 5.3.1.10 Análise dos Resultados das Simulações por Trechos da Linha e de Melhoria de Desempenho

A Tabela 5-21 apresenta os resultados por trecho, considerando os valores de resistividade do solo. Os casos a, b e c são as taxas de desligamento caso fossem reduzidas todas

as resistências acima de 30, 60 e 90  $\Omega$  respectivamente, conforme comentado anteriormente. O valor entre parênteses é o percentual de melhoria de desempenho que seria obtido.

Seção (torres)	Distância (m)	Desligamentos/100km/ano			
		Real	Rat>30 $\Omega$	Rat>60 $\Omega$	Rat>90 $\Omega$
261-265	2339	0,65	0,22 (-66,2%)	-	-
265-269	3146	0,21	-	-	-
269-273	1860	0,14	0,06 (-57,1%)	-	-
273-277	2230	0,60	0,12 (-80,0%)	0,36 (-40,0%)	-
277-280	2416	0,63	0,30 (-56,5%)	-	-
320-324	1858	0,69	0,16 (-76,8%)	0,16 (-76,8%)	-
324-328	1975	1,16	0,04 (-96,6%)	0,04 (-96,6%)	0,30 (-74,1%)
328-332	2467	0,14	0,01 (-92,9%)	-	-
352-356	1811	1,32	0,45 (-65,9%)	0,54 (-59,1%)	0,71 (-46,2%)
356-360	1491	0,00	-	-	-
<b>Média Ponderada:</b>		<b>0,54</b>	<b>0,16 (-58,3%)</b>	<b>0,30 (-24,5%)</b>	<b>0,41 (-10,6%)</b>

Tabela 5-21 Resumo dos resultados por trecho considerando a resistividade do solo

A seção 265 - 269, que não possui  $Rat > 30\Omega$ , apresenta uma taxa de desligamentos maior que a seção 269 - 273, que possui uma  $Rat > 30\Omega$ . Isso acontece porque o número de *strokes*/km<sup>2</sup>/ano na primeira seção e também o comprimento de seu vão médio são maiores que os da segunda seção. A seção 269 - 273 possui resistências de aterramento e densidade de descargas muito semelhantes às da seção 277 - 280, porém, esta possui taxa de desligamentos maiores que aquela. O comprimento do vão médio da seção 277 - 280 é quase o dobro do comprimento do vão médio da seção 269 - 273.

Isso indica que no *software*, além da influência da densidade de descargas e da resistividade do solo (quando utilizado o modelo de ionização do solo) há também uma influência do comprimento do vão no cálculo da taxa de desligamentos.

Conforme descrito anteriormente, o efeito de ionização do solo só é importante para eletrodos concentrados, ou seja, para cabos contrapeso curtos e valores elevados de correntes de descarga. Para eletrodos longos, como é usual em linhas de alta tensão, este efeito praticamente não afeta o comportamento do aterramento. Por isto foi simulada também a taxa de desligamentos referente ao caso de resistividade nula e valor da resistência de aterramento igual 65% do valor original buscando representar o valor da impedância impulsiva do aterramento. A Tabela 5-22 apresenta estes resultados comparados com os da Tabela 5-21

Trecho (torres)	Distância (m)	Desligamentos/100km/ano				
		c/ Resistiv.	Resistiv. 0 65% Ratt	Rat>30 Ω	Rat>60 Ω	Rat>90 Ω
261-265	2339	0,65	0,45	0,00 (-100%)	-	-
265-269	3146	0,21	0,12	-	-	-
269-273	1860	0,14	0,06	0,04 (-66,7%)	-	-
273-277	2230	0,60	0,80	0,00 (-100%)	0,20 (-75,0%)	-
277-280	2416	0,63	0,51	0,05 (-90,2%)	-	-
320-324	1858	0,69	0,82	0,00 (-100%)	0,00 (-100%)	-
324-328	1975	1,16	2,82	0,03 (-98,9%)	0,03 (-98,9%)	0,49 (-82,6%)
328-332	2467	0,14	0,26	0,01 (-96,2%)	-	-
352-356	1811	1,32	3,03	0,55 (-81,8%)	0,61 (-79,9%)	1,50 (-50,5%)
356-360	1491	0,00	0,00	-	-	-
<b>Média Ponderada:</b>		<b>0,54</b>	<b>0,82</b>	<b>0,08</b> (-72,5%)	<b>0,23</b> (-32,1%)	<b>0,48</b> (-11,8%)

Tabela 5-22 – Comparação de resultados de simulações com e sem resistividade do solo

Comparando-se os resultados obtidos para o valor de resistência próxima ao valor da impedância impulsiva com os resultados que computam a resistividade do solo e a ionização, observa-se que na última hipótese há redução da taxa de desligamentos nos trechos 265-269, 269-273, 320-324 e 328-332 e aumento desta taxa nos demais trechos, exceto para o trecho 356-360 onde esta taxa não se alterou. Deve-se observar, no entanto, um aumento bastante significativo das taxas de desligamentos nos trechos 324-328 e 352-356.

O valor da taxa de desligamentos dado pela média ponderada dos trechos considerando a impedância impulsiva de aterramento teve maior aproximação da taxa de desligamentos real da linha (1,14 desligamentos/100 km/ano).

### 5.3.2 Por Estudos Múltiplos

Esta análise visa, através de diversas simulações, gerar um valor aproximado para a taxa de desligamentos/100 km/ano da linha em toda sua extensão, levando em conta todas as resistências de aterramento da mesma e os respectivos comprimentos dos vãos, fornecidos ao programa através de um arquivo em Excel como explicado anteriormente. Nas Figuras 5-7 e 5-8 são mostrados os perfis das resistências de aterramento e dos vãos posteriores, respectivamente, das torres na linha. Para as resistências de aterramento que não tinha medição recente foi utilizado o valor de  $20\Omega$ .

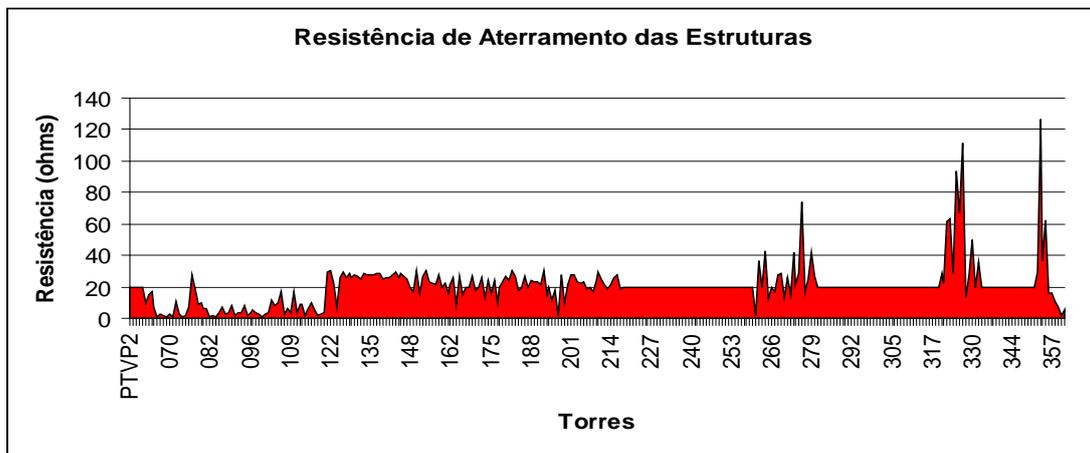


Figura 5-7 Perfil das resistências de aterramento das torres da linha.

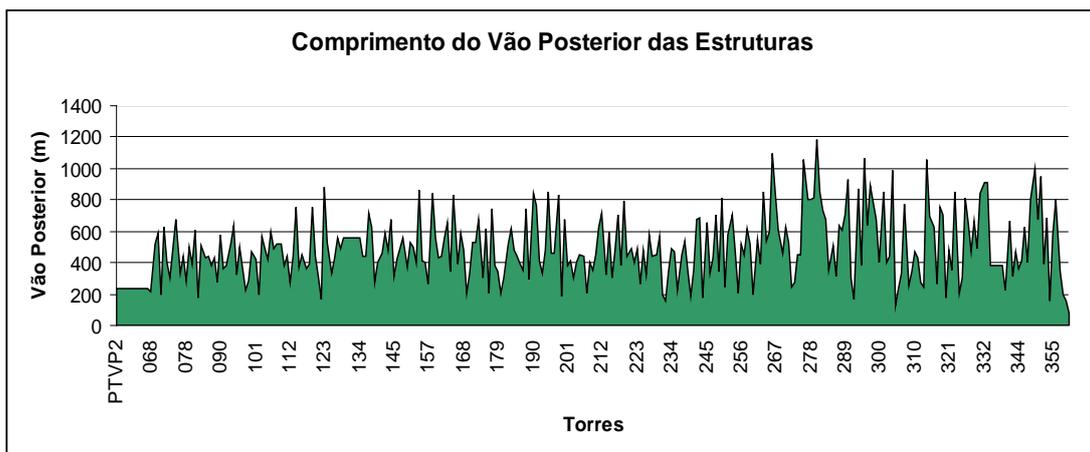


Figura 5-8 Perfil do comprimento dos vãos posteriores das torres da linha.

### 5.3.2.1 Estudos Múltiplos considerando Resistividade do Solo

No arquivo de entrada foram considerados os valores de 100% das resistências de aterramento das torres e resistividade do solo não-nula. Foram tomados como referência para realização dos estudos múltiplos, cada uma das seções simuladas anteriormente.

seção base (torres)	Comprimento (m)	Desligamentos/100km/ano			
		Real	Rat>30 Ω	Rat>60 Ω	Rat>90 Ω
261-265	2339	0,807	0,430 (-46,5%)	0,498 (-38,3%)	0,632 (-21,7%)
265-269	3146	0,997	0,509 (-48,9%)	0,604 (-39,4%)	0,780 (-21,8%)
269-273	1860	0,594	0,277 (-53,4%)	0,328 (-44,8%)	0,440 (-25,9%)
273-277	2230	0,804	0,431 (-46,4%)	0,498 (-38,1%)	0,631 (-21,5%)
277-280	2416	1,152	0,620 (-46,2%)	0,722 (-37,3%)	0,923 (-19,9%)
320-324	1858	0,663	0,339 (-48,9%)	0,390 (-41,2%)	0,508 (-23,4%)
324-328	1975	0,708	0,368 (-48,0%)	0,424 (-40,1%)	0,547 (-22,7%)
328-332	2467	0,540	0,128 (-76,3%)	0,186 (-65,6%)	0,322 (-40,4%)
352-356	1811	0,721	0,375 (-48,0%)	0,438 (-39,3%)	0,560 (-22,3%)
356-360	1491	0,278	0,066 (-76,3%)	0,095 (-65,8%)	0,166 (-40,3%)
Média Ponderada das seções:		0,759	0,372 (-53,3%)	0,439 (-44,4%)	0,577 (-25,6%)

Tabela 5-23 Resultados dos estudos múltiplos considerando resistividade do solo

Como mostrado, os valores mais altos de desligamentos/100km/ano ocorreram nos trechos 277-280, 265-269, 261-265 e 273-277. Pode-se notar uma estreita relação entre o comprimento da seção utilizada como base para a simulação e a taxa de desligamentos obtida.

### 5.3.2.2 Estudos Múltiplos com impedância impulsiva (65% da resistência de aterramento das torres e resistividade do solo nula)

A tabela 5-24 apresenta os resultados obtidos para os estudos múltiplos considerando a impedância impulsiva do aterramento. No arquivo de entrada foram utilizados os valores de 65% das resistências de aterramento das torres e resistividade do solo nula.

Trecho base (torres)	Distância (m)	Desligamentos/100km/ano			
		Real	Rat>30 Ω	Rat>60 Ω	Rat>90 Ω
261-265	2339	0,434	0,192 (-55,8%)	0,227 (-47,7%)	0,308 (-29,0%)
265-269	3146	0,534	0,236 (-55,8%)	0,283 (-47,0%)	0,390 (-27,0%)
269-273	1860	0,517	0,264 (-48,9%)	0,304 (-41,2%)	0,392 (-24,2%)
273-277	2230	0,366	0,126 (-55,7%)	0,164 (-55,2%)	0,247 (-32,5%)
277-280	2416	0,564	0,211 (-62,6%)	0,265 (-53,0%)	0,391 (-30,7%)
320-324	1858	0,344	0,150 (-56,4%)	0,177 (-48,5%)	0,236 (-31,4%)
324-328	1975	0,345	0,126 (-63,5%)	0,159 (-53,9%)	0,234 (-46,2%)
328-332	2467	0,393	0,136 (-65,4%)	0,176 (-55,2%)	0,266 (-22,9%)
352-356	1811	0,354	0,125 (-64,7%)	0,160 (-54,8%)	0,239 (-39,2%)
356-360	1491	0,154	0,020 (-87,0%)	0,030 (-80,5%)	0,070 (-54,5%)
Média Ponderada das seções		0,417	0,166 (-60,7%)	0,204 (-52,8%)	0,290 (-32,5%)

Tabela 5-24 Resultados dos estudos múltiplos com resistividade zero e 65% Ratt

Houve uma redução significativa da taxa de desligamentos da linha considerando a impedância impulsiva em relação a taxa obtida com os estudos múltiplos com a inclusão da resistividade do solo. Esta mesma relação não se verificou nas simulações realizadas por trechos. Para analisar o que ocorreu é necessário analisar os próximos itens.

### 5.3.2.3 Estudos múltiplos com resistências médias

As resistências de aterramento de todas as torres foram classificadas em:

- média de 65% do valor da resistência de aterramento das torres críticas (22,8 Ω).
- média de 65% do valor da resistência de aterramento das torres em que há medição (13 Ω).

Trecho base (torres)	Distância (m)	Backflashovers/100km/ano	
		Rat = 13 Ω	Rat = 22,8 Ω
261-265	2339	0,178	0,493
265-269	3146	0,215	0,664
269-273	1860	0,246	0,636
273-277	2230	0,115	0,365
277-280	2416	0,195	0,546

320-324	1858	0,137	0,432
324-328	1975	0,115	0,365
328-332	2467	0,124	0,393
352-356	1811	0,115	0,365
356-360	1491	0,018	0,057
Média Ponderada das partes:		0,153	0,454

Tabela 5-25 Resultados das simulações com valores de resistência média para todas as torres

Pode-se observar que para as resistências médias de aterramento tanto com 22,8 $\Omega$  quanto com 13 $\Omega$ , as taxas obtidas estão bem abaixo da taxa real da linha (aproximadamente 1 desligamento/100km/ano), o que pode sugerir que as resistências de aterramento reais da linha, para as torres que não possuem medição são um pouco maior que as resistências de aterramento fornecidas pelo arquivo de entrada ou que o aplicativo não está modelando algum processo com exatidão suficiente.

### 5.3.2.2 Estudos múltiplos com variação das resistências sem medição recente

No arquivo de entrada foram consideradas as resistências de aterramento para as torres em que esta foi medida. Para completar, para as resistências das torres em que não havia medição, foram considerados de cada vez os valores de 0, 6,5 (1/3 do valor médio), 13 (2/3 do valor médio) e 19,5  $\Omega$  (valor médio aproximado.)

Trecho base (torres)	Distância (m)	<i>Backflashovers/100km/ano</i>			
		0 $\Omega$	6,5 $\Omega$	13 $\Omega$	19,5 $\Omega$
261-265	2339	0,383	0,383	0,434	0,545
265-269	3146	0,467	0,467	0,534	0,708
269-273	1860	0,453	0,453	0,517	0,657
273-277	<u>2230</u>	0,325	0,325	0,366	0,454
277-280	<u>2416</u>	0,507	0,507	0,564	0,688
320-324	<u>1858</u>	0,296	0,296	0,344	0,449
324-328	<u>1975</u>	0,304	0,304	0,345	0,436
328-332	<u>2467</u>	0,349	0,349	0,393	0,488
352-356	<u>1811</u>	0,313	0,313	0,354	0,442
356-360	<u>1491</u>	0,149	0,149	0,154	0,168
Média Ponderada das partes:		0,369	0,369	0,417	0,526

Tabela 5-26 Resultados das simulações com valores de resistência média para todas as torres

---

Observa-se que utilizando o valor de  $19,5\Omega$  para completar o valor da resistência das torres sem medição recente, obtem-se a taxa que mais se aproxima do valor real da linha, que atualmente é de um desligamento por 100km por ano, em média. Com este valor de resistência nas torres sem medição a relação entre as taxas de desligamento para as simulações com e sem resistividade se aproximam tanto para os estudos múltiplos como para as simulações por trechos.

#### ***5.4 Análise das Simulações Realizadas no SIGMA SLP***

Em todas as simulações, foi observado que a taxa de falhas de blindagem são muito baixas. Para estudos de desempenho de Linhas de Transmissão os estudos múltiplos se mostraram mais satisfatórios que o estudo por trechos, pois leva em consideração todo o comprimento da linha. O estudo por trechos, no SIGMA, é apropriado para uma análise mais localizada.

Os resultados para a linha de 500 kV apresentaram divergência dos dados reais de desempenho da linha (0,82 e 0,75 *backflashover* / 100 km / ano). Isto pode ser devido à ocorrência de mecanismos de desligamento por descarga não considerados pelo *software*, existência de algum trecho crítico para ocorrências por descarga que não teve os valores de resistência medidos ou ocorrência de desligamentos por outras causas, *software* com modelagem inadequada.

No capítulo seguinte é avaliado o fenômeno da ruptura a meio de vão e seus principais parâmetros, que poderiam explicar, pelo menos parcialmente, a divergência encontrada aqui entre o resultado simulado e o real. Ali é proposta uma forma de considerar este efeito em análises similares às realizadas pelo aplicativo SIGMA SLP, mas não necessariamente através do uso deste.

---

# 6 Avaliação de Ruptura a Meio de Vão Considerando Efeito Corona e Correntes de Pré-ruptura

## 6.1 Introdução

A literatura internacional atribui importância secundária à ruptura por descargas a meio de vão em decorrência da hipótese de efeito intenso de dois fatores mitigantes da sobretensão resultante deste tipo de ocorrência: o Efeito Corona desenvolvido nos condutores de blindagem no ponto de incidência e as designadas "Correntes de Pré-descarga". Este capítulo é dedicado à avaliação do impacto destes efeitos.

O Efeito Corona, provocado pelo aumento do campo elétrico acima de um nível crítico nas proximidades do condutor atingido por uma descarga, é capaz de promover a atenuação e distorção das ondas de sobretensão desenvolvidas na linha aérea atingida. A literatura considera tais efeitos no caso das ondas viajantes de sobretensão que se propagam ao longo dos condutores da linha aérea, mas não aborda especificamente a questão da redução da sobretensão no ponto de incidência, devido ao Efeito Corona ali desenvolvido. Este é o fator realmente relevante para diminuição da probabilidade de desligamento por incidência da descarga atmosférica a meio de vão.

Para se obter com maior precisão a probabilidade de desligamento em simulações de desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas, é necessário considerar a presença do Efeito Corona através de modelos capazes de representar consistentemente esse fenômeno. A literatura apresenta modelos considerados satisfatórios para contemplar o efeito no caso da sobretensão desenvolvida em decorrência da incidência na torre ou nos cabos próximos a esta,

para avaliação da probabilidade de ocorrência de *backflashover* e *flashover*, como os trabalhos de (Dudurych e Gallagher, 2003). Aparentemente, a baixa expectativa de ocorrência de ocorrência de ruptura a meio de vão é responsável pela carência de trabalhos, como (Rocha, L.C 2009), dedicados à influência do Efeito Corona neste evento. A experiência na manutenção de linhas de extra-alta tensão nas condições típicas do Brasil, como a exemplificada no capítulo 4, sugere que este evento não seja tão raro, requerendo a aplicação de modelagens mais elaboradas para avaliação da influência do Efeito Corona na sua ocorrência.

Por outro lado, trabalhos tradicionais da literatura técnica apontam as designadas Correntes de Pré-ruptura como o principal mecanismo responsável pela redução da probabilidade de ocorrência de descargas a meio de vão (Wagner, 1963) e, aparentemente, faltam análises críticas consubstanciadas para quantificar e validar tal hipótese.

Neste contexto, este capítulo considera a influência do Efeito Corona na propagação de ondas e como os modelos deste fenômeno não-linear evoluíram e são considerados nas simulações de transitórios eletromagnéticos. Alguns desses modelos são testados de forma a verificar a adequação de sua inclusão no estudo de caso de ruptura a meio de vão. O modelo escolhido é utilizado na avaliação de casos reais da linha de 500 kV apresentada no capítulo 4. Complementarmente, nele se desenvolve uma análise crítica acerca da influência das Correntes de Pré-ruptura neste tipo de evento.

## ***6.2 Influência do Efeito Corona na Propagação de Ondas Associadas a Correntes de Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão***

### ***6.2.1 Descrição do Fenômeno***

O Efeito Corona se desenvolve radialmente a partir da superfície de um condutor, promovendo a ionização do ar, quando determinado limiar de intensidade de campo elétrico é excedido. Tal limiar, conhecido como campo de inepção de corona, depende das características do condutor e de parâmetros como pressão e umidade do ar (Peek, 2007). Há diversas fórmulas empíricas para obtenção desse valor e na referência acima é aplicada a equação 6-1:

$$E_c = 30m\delta^{0,67} \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta r}}\right) kVcm^{-1} \quad \text{Equação 6-1}$$

Onde:

$\delta$  – umidade relativa do ar

$m$  – rugosidade da superfície.

---

Conforme ilustrado na Figura 6-1, acima do valor crítico do campo elétrico, elétrons liberados do condutor por fotoionização são acelerados através do gás (ar) pela ação do campo e adquirem energia suficiente para se chocarem com outros átomos neutros e, desta forma, produzir íons por meio da liberação de elétrons dos orbitais mais externos dos átomos em decorrência da colisão. Este processo é conhecido como ionização por impacto de elétrons. Desta forma, cada um dos elétrons pode liberar outros elétrons formando uma reação em cadeia e, conseqüentemente, ionizando o ar no entorno do condutor. Os elétrons se multiplicam criando também mais íons positivos à medida que se chocam com os átomos. Uma vez que o processo se torna auto-sustentável pelo efeito de produção de novos elétrons no gás a partir do condutor, está estabelecido o efeito conhecido como Efeito Corona. (EPRI, 1982).

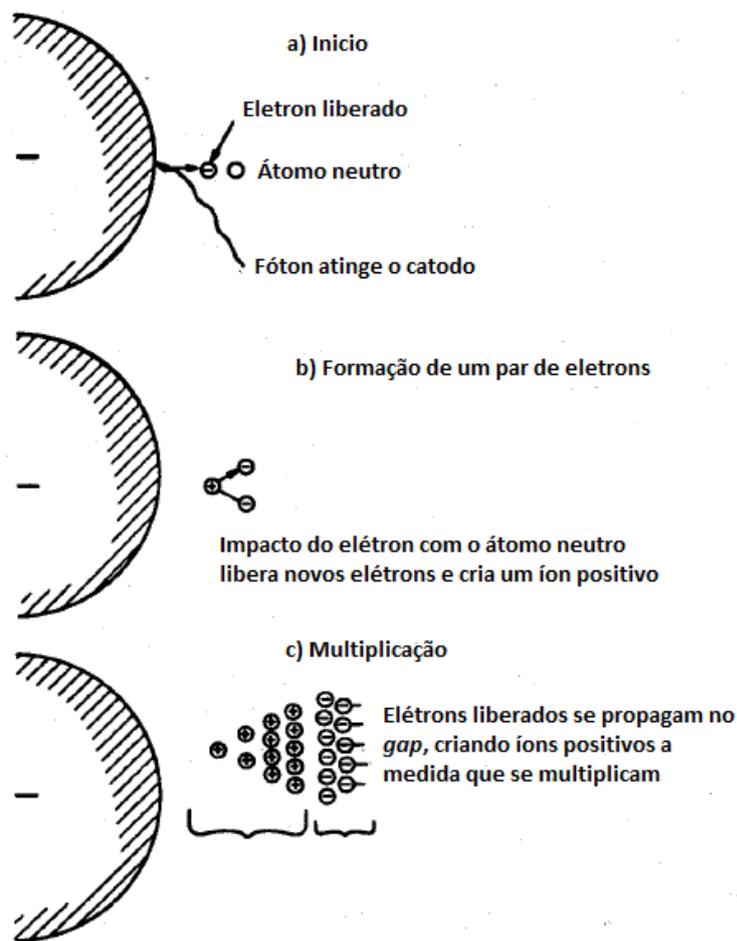


Figura 6-1 Início de um processo de avalanche de elétrons (adaptado de EPRI(1982))

Quando uma descarga atinge um condutor de uma linha de transmissão, a sobretensão associada provoca o aparecimento do Efeito Corona. A dissipação de energia pela injeção de cargas espaciais ao redor do condutor, causada pelo Efeito Corona, influencia na distorção e atenuação da onda à medida que ela se propaga nos cabos em direção a terra (Santiago, 1987 e Gary, 1989). O efeito pode ser modelado como um aumento do raio equivalente do condutor,

que resulta no aumento do valor dos parâmetros transversais da linha, a sua capacitância e sua condutância por unidade de comprimento.

### 6.2.2 Atenuação e Distorção de Ondas devido ao Efeito Corona

Para caracterizar melhor a influência do Efeito Corona na propagação de ondas viajantes, considera-se a característica carga x tensão típica de um condutor, apresentada na Figura 6-2 (Wagner e Lloyd, 1955).

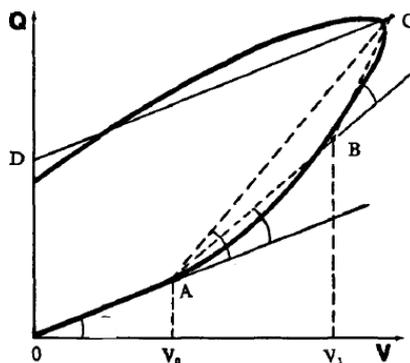


Figura 6-2 Característica Q-V típica de um condutor sob corona (adaptado de Carneiro e Marti (1991))

Pelo gráfico, observa-se que enquanto a tensão aplicada ao condutor é menor que a tensão de inceptação de Corona, o aumento da carga é devido apenas à capacitância geométrica da linha ( $C_{geom}$ ), sendo uma função linear da tensão  $V$  (fase OA).

$$Q = C_{geom} \cdot V \quad \text{Equação 6-2}$$

A partir da tensão crítica (fase ABC), passa a ocorrer a deposição de cargas ao redor do condutor devido ao rompimento do limiar de campo elétrico, caracterizando a presença de Efeito Corona. Pelo gráfico observa-se que nesta fase a capacitância aumenta, uma vez que é dada pela derivada da carga pela tensão conforme a equação 6-3. À medida que a tensão e a capacitância total do condutor aumentam, a curva assume uma característica não-linear.

$$C_d = \frac{dQ}{dV} = C_{geom} + C_{cor} \quad \text{Equação 6-3}$$

Onde:

$C_d$  é a capacitância dinâmica.

$C_{cor}$  é a capacitância adicional devido ao Efeito Corona.

Assim que a tensão atinge seu valor máximo (fase CD) e começa a decrescer, o Efeito Corona passa a se reduzir e a capacitância do condutor é reduzida novamente para um valor próximo ao da capacitância geométrica  $C_{geom}$ .

A alteração no valor da capacitância do condutor devido ao Efeito Corona define uma nova velocidade de propagação das ondas de sobretensão e corrente ao longo da linha:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_d}} \quad \text{Equação 6-4}$$

Assumindo que  $C_d$  é função da tensão (V), a cada seção entre V e  $V \pm \Delta V$  a onda se move a uma velocidade diferente, correspondente a valor instantâneo da capacitância  $C_d$ , menor que a velocidade da luz (c). O atraso no tempo de propagação  $\Delta t$  é expresso por (Gary, 1989):

$$\Delta t = \Delta l \left( \frac{1}{v} - \frac{1}{c} \right) \quad \text{Equação 6-5}$$

A forma de distorção na onda de sobretensão decorrente deste efeito foi obtida experimentalmente em (Santiago, 1987). A Figura 6-3 ilustra esse efeito conforme em (Gary, 1989).

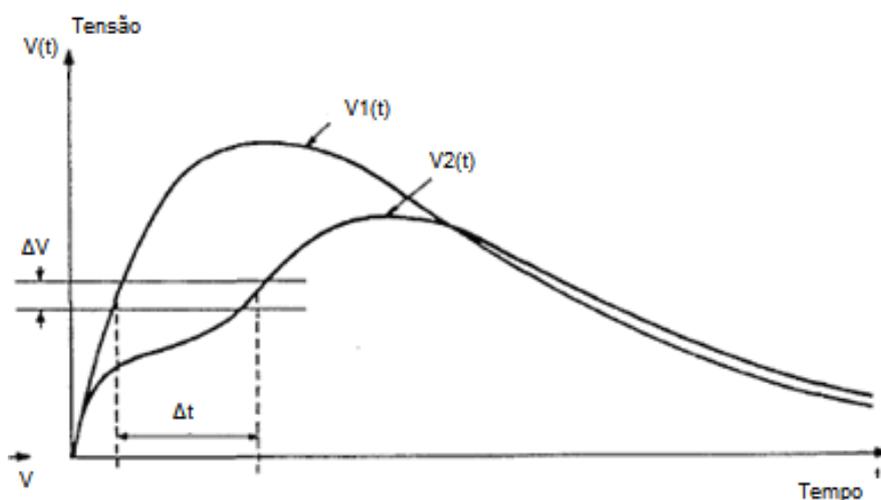


Figura 6-3 – Distorção de onda viajante por influência do Efeito Corona (adaptado de Gary(1989))

Os efeitos de atenuação e distorção de ondas viajantes propagadas em linhas de transmissão, por influência do Efeito Corona, têm sido estudados por muitos autores nas últimas décadas, dos quais se pode citar (Skillings e Dykes, 1937), (McCann, 1947) (Wagner e Lloyd, 1955), (Gary et al., 1978), (Santiago, 1987), (Carneiro e J. Marti, 1991), (Correia de Barros, 1995) dentre outros, em busca de modelos adequados para sua inclusão em simulações e experimentos de sobretensão em linhas de transmissão e subestações. O item 6.3 apresenta um

breve resumo dos modelos desenvolvidos até hoje para estudos de sobretensão considerando o Efeito Corona.

### ***6.3 Evolução da Modelagem de Efeito Corona para Simulações de Transitórios em Linhas de Transmissão***

#### ***6.3.1 Modelagem pelo Aumento do Raio Equivalente do Condutor***

Uma das primeiras propostas para inclusão do Efeito Corona em modelos de linhas de transmissão foi feita por McCann (1947) e adotada pela EPRI (1982). O modelo proposto define um raio efetivo para o condutor sob corona, maior que o raio original. Este aumento no raio representa o efeito como uma maior seção do condutor em que ocorre o transitório eletromagnético.

Neste modelo, o envelope de corona é considerado cilíndrico e simétrico. O raio máximo de corona  $R_C$  é calculado a partir da equação 6-6 abaixo, em metros:

$$R_C \ln\left(\frac{2h}{R_C}\right) = \frac{V}{E_0} \quad \text{Equação 6-6}$$

Onde

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

$h_t$  – altura do condutor sob corona;

$f_{cond}$  – flecha do condutor;

V – tensão máxima aplicada ao cabo, em kV;

$E_0$  – campo elétrico crítico de corona, kV/m.

A partir do raio máximo de corona  $R_C$ , calcula-se o raio efetivo do condutor pela média geométrica dos efeitos de acoplamento com e sem o envelope de corona, e por fim este raio é utilizado nas simulações.

$$\ln \frac{2h}{R} = \sqrt{\ln \frac{2h}{r} \cdot \ln \frac{2h}{R_C}} \quad \text{Equação 6-7}$$

Onde

R – raio efetivo considerando efeito corona

r – raio do condutor sem efeito corona

---

A modelagem de corona pelo aumento do raio equivalente do condutor, tal qual apresentada em sua proposta original, apesar de consistir numa aproximação razoável para a simulação do efeito, não é muito precisa, pois atribui ao condutor um novo raio aumentado e fixo, devido ao Efeito Corona. Este raio é assumido durante toda simulação independentemente do nível da sobretensão no condutor. Portanto, não leva em consideração a dinâmica do processo de formação do envelope de corona. Esta abordagem elimina a distorção da onda pela presença do fenômeno e fornece uma estimativa bastante conservadora da atenuação, como pode ser observado pelos resultados apresentados em (Rocha, L.C, 2009). Nos itens seguintes, esta aproximação é designada "modelo de raio aumentado".

### 6.3.2 Modelagem por Circuitos Análogos

Wagner (1955) propôs uma modelagem do efeito por circuitos análogos de parâmetros concentrados formados por resistores, capacitores e diodos, conectados ao longo de segmentos de comprimento fixo da linha. Tal modelo foi aprimorado por outros autores como Maruvada et al. (1977) e Kudyan e Shih (1981) com foco na representação das perdas. A Figura abaixo apresenta alguns exemplos desses modelos:

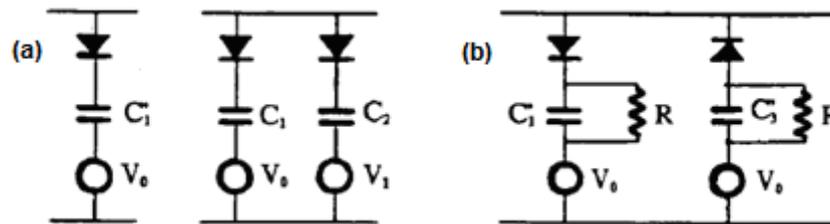


Figura 6-4 - Modelos de circuitos análogos: a) Wagner (1955) b) Kudyan e Shih (1977)

Os resistores e os capacitores representam as perdas de energia por corona e a variação da capacitância total da linha, enquanto a fonte de tensão CC representa a tensão de inepção de corona  $V_0$ . Abaixo da tensão  $V_0$ , o diodo impede que o capacitor seja carregado, mantendo a capacitância da linha igual à sua capacitância geométrica.

Para testar e verificar a adequação do modelo à necessidade de simulação aqui proposta, foi realizada uma simulação no ATP considerando a propagação de um surto de sobretensão em um trecho de linha composto por um condutor simples, com as mesmas características do cabo de blindagem de uma linha de transmissão de 500 kV. O circuito utilizado para representar o Efeito Corona foi o proposto por Wagner (1955), inserido a cada seção de 50m de linha, de forma que o comprimento da seção fosse percorrido pela onda em uma fração do tempo de trânsito.

A Figura 6-5 exemplifica como foi montado o circuito no ATPDraw. A inclusão dos resistores em paralelo com os capacitores de corona não apresentaram nenhuma melhoria em

simulações semelhantes a esta apresentadas em (Carneiro e Marti, 1991), por isso foram ignorados nesta simulação.

Para modelar a linha de transmissão foi utilizado um modelo com perdas e parâmetros distribuídos variáveis na frequência (J. Marti, 1982). O valor da capacitância adicional de corona e o da tensão crítica foram os mesmos definidos em (Kudian, 1977)

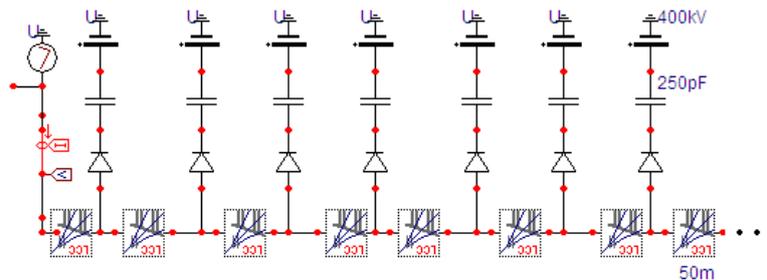


Figura 6-5 – Modelagem no ATPDraw para teste do modelo de circuitos análogos

A onda utilizada foi uma onda triangular de 1/10 $\mu$ s com amplitude de 1,6 MV. Na Tabela 6-1 abaixo estão resumidos os dados utilizados na simulação.

<b>Modelo da Linha</b>	LCC – Bergeron
<b>Fases</b>	1 (cabo de blindagem)
<b>Raio do condutor</b>	0,555 cm
<b>Altura</b>	40,3 m
<b>Flecha do condutor</b>	15,0 m
<b>Comprimento do trecho simulado</b>	1100 m
<b>Capacitância de corona</b>	5 pF/m
<b>Tensão crítica</b>	400 kV

Tabela 6-1 – Dados utilizados na simulação no ATP do modelo de circuitos análogos

A Figura 6-6 apresenta o resultado obtido na simulação adotando-se o modelo de circuitos análogos. Todavia, a capacitância adicional de corona ainda é representada aqui por um acréscimo estático ao valor da capacitância geométrica, o que não representa a natureza dinâmica do Corona, responsável por promover o aumento contínuo da capacitância em função da tensão, a partir do limite crítico de tensão.

O resultado obtido aqui é condizente com o obtido por Carneiro e Marti (1991), que por sua vez foi comparado com experimentos realizados em laboratório e em uma linha real de 220 kV, apresentando resultados semelhantes (Gary, 1978 e 1989).

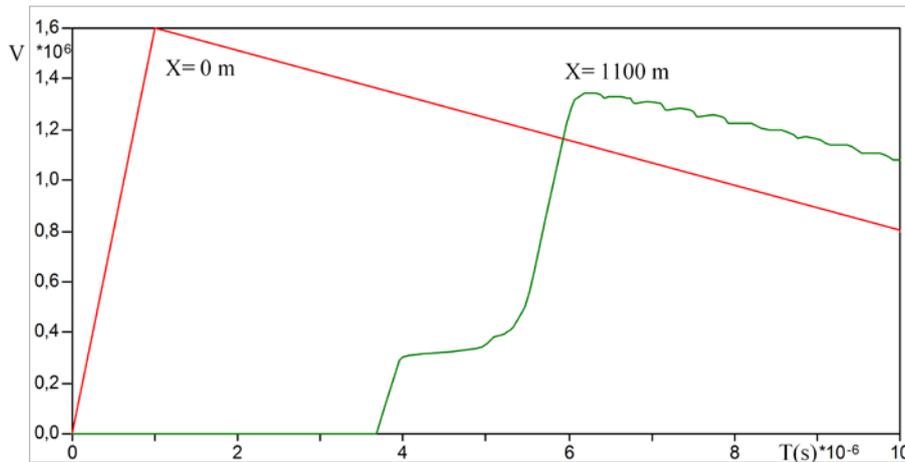


Figura 6-6 – Resultado da simulação da representação do Efeito Corona por circuitos análogos no ATP

Conforme concluído no trabalho de Carneiro e Marti (1991), um efeito indesejável deste tipo de modelagem são as oscilações na cauda da onda devido às reflexões nas junções entre as seções e devido ao chaveamento dos diodos. Todavia, os valores desenvolvidos de sobretensão máxima e a distorção da onda não são afetados. Logo, para a finalidade aqui proposta, isso não é muito preocupante.

### 6.3.3 Modelagem Analítica da Curva Q-V

A partir do início da década de 80 começaram a surgir modelos analíticos para inclusão do Efeito Corona em simulações de transitórios em linhas de transmissão. Estes modelos procuram descrever matematicamente a característica Q-V da linha sob corona, com a proposta de utilização de uma capacitância dinâmica para representar a fase de ionização: por um ou mais segmentos de reta (aproximação linear) (Santiago, 1987), (Gary, 1982), ou por funções mais próximas da característica real da curva como os descritos resumidamente abaixo, propostos por Suliciu (1981) e Gary (1990).

O modelo dinâmico de Suliciu propõe o uso de um conjunto de equações diferenciais de primeira ordem de forma a se aproximar a curva Q-V calculada da curva medida. A corrente de corona é dada por:

$$i_c = \frac{dq_c}{dt} = \begin{cases} 0 & \text{se } g_2 \leq 0 \\ g_2 & \text{se } g_1 \leq 0 < g_2 \\ g_1 + g_2 & \text{se } 0 < g_1 \end{cases} \quad \text{Equação 6-8}$$

Onde  $g_j = k_j [(c_j - c_0)(v(t) - v_j) - q_c]$ ,  $j = 1, 2$  Equação 6-9

e  $c_2 > c_1 > c_0$ ;  $v_1 \geq v_2$ ;  $k_1, k_2 > 0$

Na expressão acima,  $c_0$  é a capacitância geométrica da linha e os parâmetros remanescentes são identificados através de um conjunto de pontos da curva Q-V (Suliciu e Suliciu, 1981).

Carneiro e Marti (1991) realizaram uma comparação do modelo de Suliciu com o modelo de aproximação linear da curva Q-V, e concluíram que ambos os modelos deram resultados próximos aos obtidos em testes de campo (Gary, 1989). Porém, considerando a maior complexidade de implementação do modelo de Suliciu, não ficou claro em que situação seria vantagem usar este modelo ao invés do modelo de aproximações lineares.

Gary (1989) propôs um modelo analítico empírico, onde a fase de ionização da curva QxV é representada por regressão parabólica, com os coeficientes obtidos com base em resultados experimentais pelo método dos mínimos quadrados. A expressão obtida por Gary para a carga  $q$  é:

$$q = \begin{cases} u \cdot C_{geom} & u \leq u_0 \\ u_0 C_{geom} \left( \frac{u}{u_0} \right)^B & u_0 < u < u_{max} \end{cases} \quad \text{Equação 6-10}$$

Sendo  $C_d = \frac{dq}{du} = C_{geom} B \left( \frac{u}{u_0} \right)^{B-1}$  Equação 6-11

Onde:

$u$  é a tensão aplicada

$u_0$  é a tensão crítica

$C_d$  é a capacitância dinâmica.

$B$  é o coeficiente obtido pelas seguintes relações empíricas, conforme Tabela 6-2.

B	Polaridade	
	+	-
Condutor simples	$0,22r + 1,2$	$0,07r + 1,12$
feixe	$1,52 - 0,15 \ln n$	$1,28 - 0,08 \ln n$

Tabela 6-2 – Fórmulas para definição do coeficiente B do modelo de Gary (1990). (Onde  $r$  é o raio do condutor simples e  $n$  raio do feixe de condutores).

O modelo de Gary apresenta boa praticidade para modelagem no ATP/EMTP e possui também uma boa aproximação da curva Q-V, necessária para uma maior precisão nas simulações e verificação da ordem de grandeza da sobretensões desenvolvidas devido ao Efeito Corona.

---

Este modelo foi implementado na linguagem MODELS (Leuven, 2004) disponibilizada no ATP e testado para verificar sua adequação às necessidades dos desenvolvimentos deste trabalho. O modelo foi conectado na linha de transmissão a cada seção de 50m através do componente *type-94*. A modelagem desse tipo de componente permite a descrição do comportamento de elementos não-lineares monofásicos ou polifásicos na linguagem MODELS e, também, em procedimentos escritos em outra linguagem e chamados dentro do algoritmo MODELS.

O modelo de Gary foi implementado como um elemento capacitivo dinâmico e não-linear através de equivalente de Norton, por ser a representação já utilizada pelo ATP para representação de capacitâncias, indutâncias e linhas de transmissão e por ser mais rápida por não necessitar calcular um equivalente de Thevenin a cada intervalo de tempo. Segue abaixo uma representação da conexão dos ramos de corona na linha de transmissão.

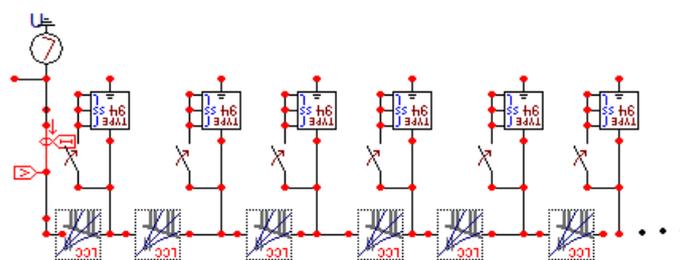


Figura 6-7 – Representação do Efeito Corona na linha de transmissão no ATPDraw pelo modelo de Gary com utilização do componente *type-94* em MODELS

Foram utilizados os mesmos dados apresentados anteriormente na simulação do modelo por circuito análogo, com a linha modelada por um condutor simples (cabo de blindagem) para fins de avaliação do modelo (Tabela 6-1). A Figura 6-8 apresenta a variação da capacitância no tempo obtida para o modelo implementado. Pelo gráfico observa-se variação da capacitância de acordo com o aumento da tensão a partir do valor crítico, ocorrido em aproximadamente 2.5  $\mu$ s.

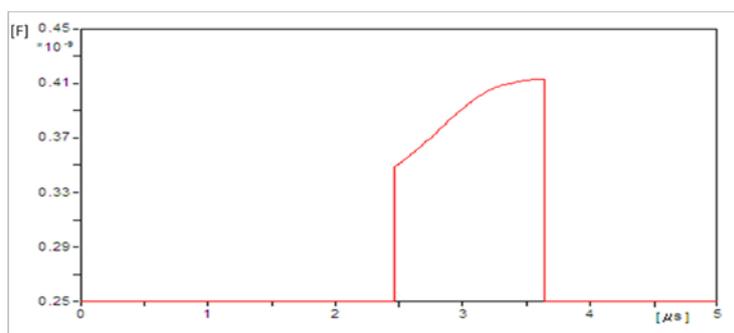


Figura 6-8 – Exemplo de variação da capacitância no tempo implementada em MODELS com o modelo de Gary

O resultado da simulação com o modelo de Gary (C dinâmico) aplicado em uma linha de transmissão de condutor simples está apresentado na Figura 6-9, junto com uma comparação

com o modelo de circuitos análogos (C fixo) e o modelo de raio aumentado (r aumentado). Pode-se observar que a distorção e atenuação da onda são um pouco mais acentuadas com utilização da capacitância dinâmica do modelo de Gary em relação ao resultado obtido com o circuito análogo. No modelo de raio aumentado, conforme esperado, nota-se a forte atenuação e ausência da distorção da onda devido as considerações comentadas no item 6.3.1.

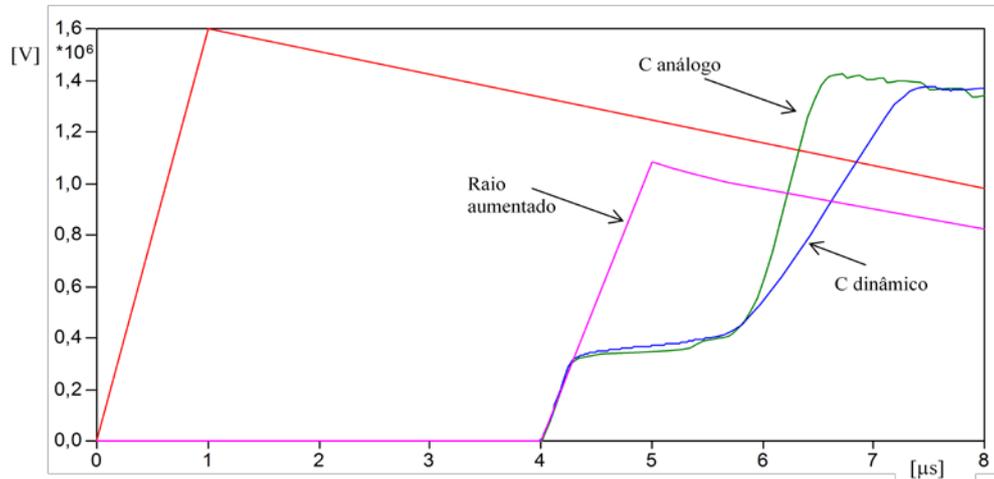


Figura 6-9 – Resultado da simulação no ATP com o modelo de Gary de capacitância dinâmica

O modelo de C dinâmico apresenta um atraso maior na onda propagada do que o modelo de C análogo porque a capacitância no primeiro caso é variável de acordo com o aumento da tensão. Logo, quanto maior a tensão, maior a capacitância do efeito corona e conseqüentemente maior a defasagem provocada na onda, o que não acontece para o C análogo, no qual, a capacitância se mantém fixa independente do valor da tensão.

Pode-se observar também uma redução maior da impedância de surto devido à maior capacitância obtida através do modelo dinâmico em tensões mais elevadas. Quanto menor a impedância de surto, menor a sobretensão desenvolvida, o que explica o fato da amplitude da onda de sobretensão do C dinâmico ser um pouco menor do que a do C análogo para o caso simulado.

Cabe comentar a discreta oscilação na cauda da onda devido à utilização do método de equivalente de Norton para cômputo do Efeito Corona à linha. Essas oscilações decorrem das reflexões nos nós onde as capacitâncias dinâmicas foram inseridas no circuito. Uma forma de resolver esse problema é através da modelagem do Efeito Corona diretamente no modelo da linha. Porém essa abordagem traz algumas complicações devido a não-linearidade do Efeito Corona. Conforme Marti (1994), mesmo apresentando essas oscilações na cauda, as curvas são muito próximas das curvas obtidas com modelos em que o Efeito Corona é implementado diretamente na linha.

### 6.3.4 Aplicação dos Modelos

Apesar de se encontrarem na literatura trabalhos dedicados à abordagem da atenuação e distorção da onda de sobretensão devido ao Efeito Corona à medida que esta onda se propaga ao longo da linha, não foram obtidas referências que fizessem a aplicação dos modelos apresentados no estudo da influência do Efeito Corona na sobretensão desenvolvida no ponto de incidência da descarga atmosférica, que é o caso de interesse para avaliar o impacto na probabilidade de ruptura a meio de vão.

Na simulação aqui proposta para avaliação das sobretensões no meio do vão, o modelo dinâmico de Gary é implementado através do elemento *type-94*, conforme explicado no item 6.3.3. Um elemento capacitivo dinâmico é conectado a cada seção de 30m de linha para representar a alteração da capacitância transversal do cabo de blindagem atingido pela descarga, à medida que a tensão no ponto de conexão ultrapassa a tensão de incepção de Corona. Este comprimento de seção foi escolhido por ser múltiplo da velocidade de propagação da onda ( $3,0 \times 10^8$  m/s), de forma a estar na faixa de 10 a 50 m usualmente utilizada na literatura (Carneiro e Marti, 1991).

A linha de transmissão modelada é a linha de 500 kV apresentada no capítulo 4. O modelo de linha aplicado é o modelo de Marti (1982) com parâmetros dependentes da frequência. A Figura 6-10 apresenta um esboço da configuração montada no ATPDraw para as simulações.

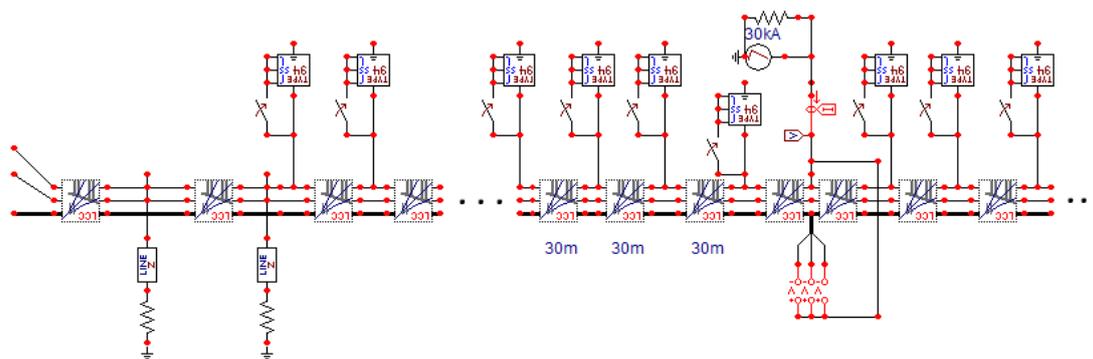


Figura 6-10 – Exemplo do esquemático da montagem da simulação do vão realizada no ATPDraw

Para avaliar a consistência do modelo e realizar uma comparação com o modelo de raio aumentado, considerado conservador quanto à intensidade do Efeito Corona, foram realizadas duas simulações com a hipótese de incidência a meio de vão. Considerou-se a injeção de uma onda de corrente triangular, de tempo de frente de  $3 \mu\text{s}$  e de amplitudes de 30 kA e 60 kA, no cabo de blindagem de um vão de 1200 m da linha. Os resultados correspondentes à tensão desenvolvida no ponto de incidência estão apresentados nas Figuras 6-11 e 6-12.

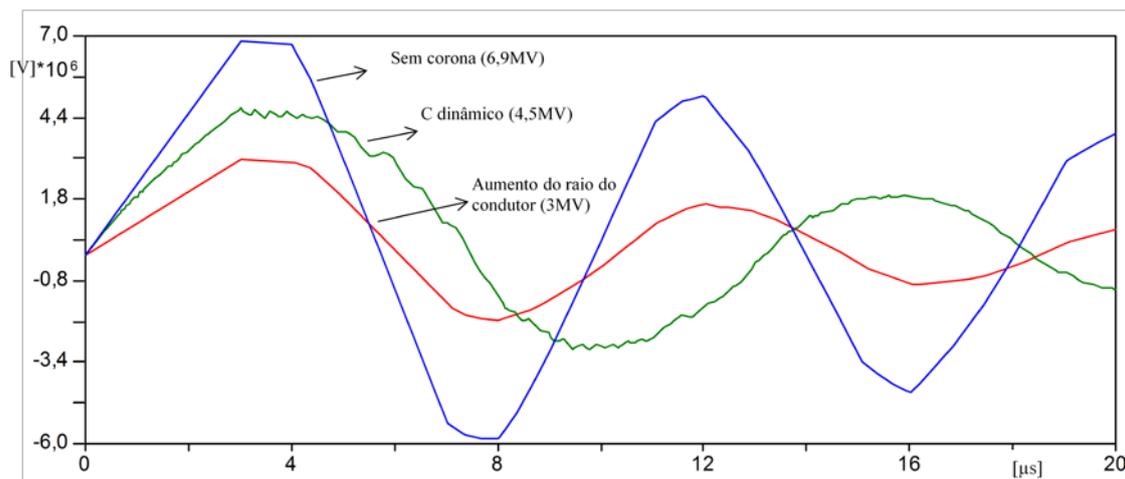


Figura 6-11 – Sobretensões desenvolvidas a meio de vão por incidência nos cabos de blindagem: comparação dos modelos de capacitância dinâmica e por aumento do raio do condutor. Corrente de 30 kA

Observa-se que a atenuação da onda pelo modelo de raio aumentado é significativamente maior do que pelo modelo dinâmico. As correspondentes sobretensões máximas valem respectivamente 3MV e 4,5 MV, com diferença da ordem de 50% do valor (1,5MV). Isto confirma a expectativa de resultado conservador da modelagem pelo aumento do raio.

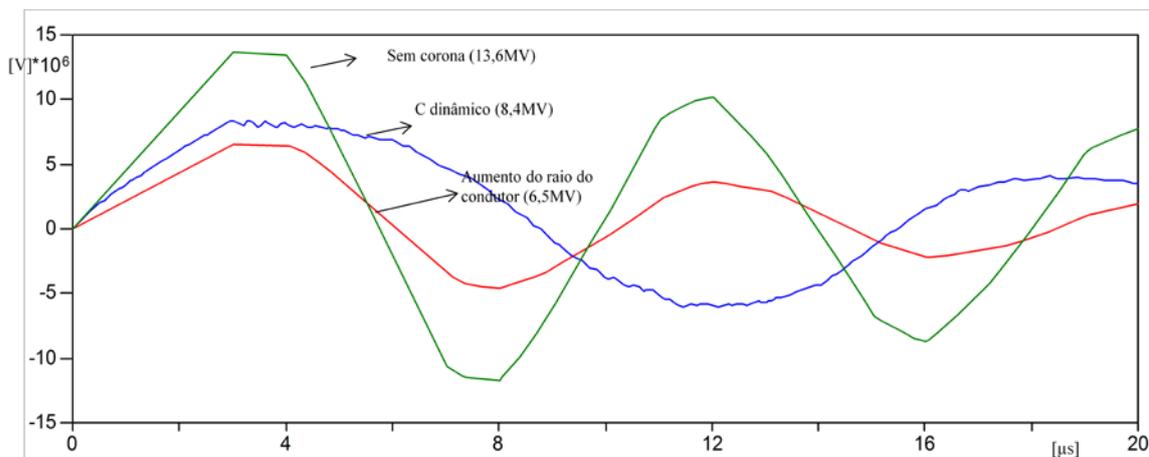


Figura 6-12 – Sobretensões desenvolvidas a meio de vão por incidência nos cabos de blindagem: comparação dos modelos de capacitância dinâmica e por aumento do raio do condutor. Corrente de 60 kA

Da mesma forma que observado para a onda de amplitude de 30 kA, para a onda de corrente de 60 kA a atenuação com o modelo de raio aumentado é maior. A diferença neste caso é de 1,9MV, proporcionalmente menor que no caso anterior. Isto indica que para correntes de amplitude muito elevada o modelo dinâmico, que considera a capacitância crescente com o nível de sobretensão, se aproxima mais do modelo de raio aumentado.

## ***6.4 Influência do Efeito Corona no Desempenho de Linhas de Transmissão frente a Descargas: Ruptura a Meio de Vão***

### ***6.4.1 Introdução***

No item 6.2 avaliou-se como o Efeito Corona influencia a onda de sobretensão associada a uma corrente de descarga incidente no meio do vão enquanto esta onda se desloca ao longo da linha de transmissão. No item 6.3 modelos normalmente utilizados para representação de Efeito Corona em simulações de transitórios foram avaliados. O modelo de Gary (1989) foi selecionado por ser compatível com os estudos convencionais de propagação mais comuns na literatura e por ser apropriado para aplicação no estudo de interesse deste item, que é a verificação da sobretensão no ponto de incidência.

### ***6.4.2 Condição para Ruptura a Meio de Vão entre Cabo de Blindagem e Fases***

A ocorrência de uma descarga em vãos longos pode gerar sobretensões até três vezes mais elevadas do que aquela desenvolvida sobre a cadeia de isoladores no caso de incidência da mesma descarga no topo da torre, conforme Soares Jr (2005), o que aumenta a probabilidade de uma ruptura e desligamento da linha de transmissão naquele ponto.

Atualmente, em sua maior parte, os aplicativos computacionais e metodologias de avaliação de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas desconsideram a ruptura a meio de vão como causa potencial de desligamentos da linha. Estes atribuem muito baixa probabilidade de ocorrência desse mecanismo de desligamento devido à presença de Efeito Corona (descrito nos itens anteriores), ao fenômeno das correntes de pré-ruptura, também citado anteriormente, e ao maior comprimento do isolamento do ar nessa região.

O Efeito Corona promove a atenuação da amplitude da onda de sobretensão que se propaga ao longo da linha, devido à variação da capacitância decorrente da ionização do ar no entorno do cabo de blindagem e, desta forma, reduz a impedância de surto da linha, vista do ponto de incidência. Assim, também a amplitude da sobretensão desenvolvida no ponto de incidência da descarga é diminuída. Se a atenuação provocada na amplitude da tensão no ponto de incidência for suficiente para reduzir o campo médio crítico entre o cabo de blindagem e fase, a probabilidade de ruptura é reduzida. Todavia, caso o valor médio de campo seja superior ao limiar de ruptura do isolamento de ar, pode ocorrer ruptura a meio de vão.

---

### 6.4.3 Resultados das Simulações

Neste item são apresentados os resultados obtidos para as simulações de incidência de descargas no meio de vão com avaliação do nível de tensão desenvolvido no ponto de incidência.

As simulações foram feitas com uma onda triangular, para obter uma resposta genérica do sistema modelado. Os parâmetros variados nas simulações foram:

- Amplitude da corrente da descarga: 15 kA, 30 kA, 45 kA, 60 kA, 75 kA
- Tempo de frente da onda: 1  $\mu$ s, 3  $\mu$ s, 5  $\mu$ s
- Comprimento dos vãos: 500m, 600 m, 900 m, 1200 m e 1500 m.

As Figuras de 6-13 a 6-35 apresentam os resultados obtidos para simulação na linha de transmissão de 500 kV apresentada no Capítulo 4, nos comprimentos de vão definidos acima. Para cada comprimento de vão foi variado o tempo de frente de onda. As formas de onda de tensão destas Figuras são as mesmas para amplitudes maiores de corrente de descarga. O que varia nesses casos é apenas a amplitude da sobretensão.

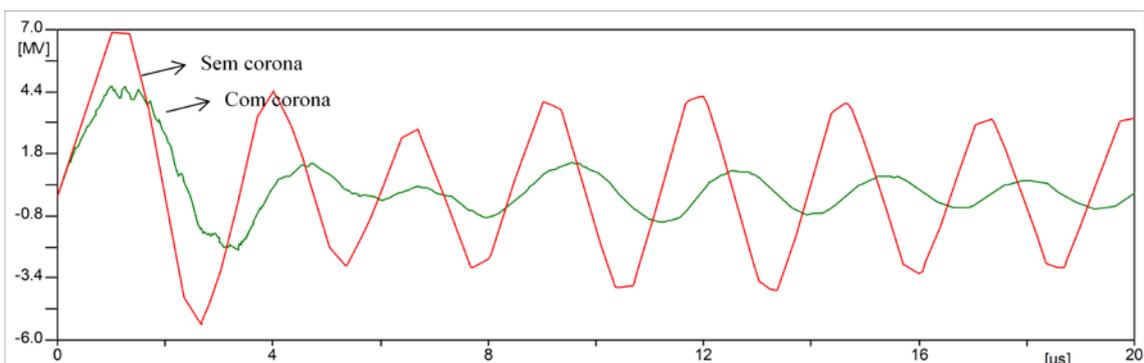


Figura 6-13 - Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 400 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 1  $\mu$ s

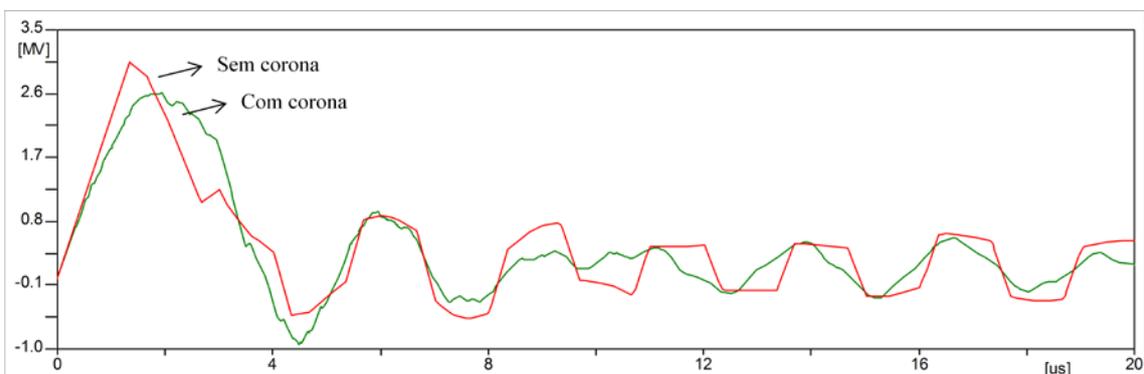


Figura 6-14 - Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 400 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 3  $\mu$ s

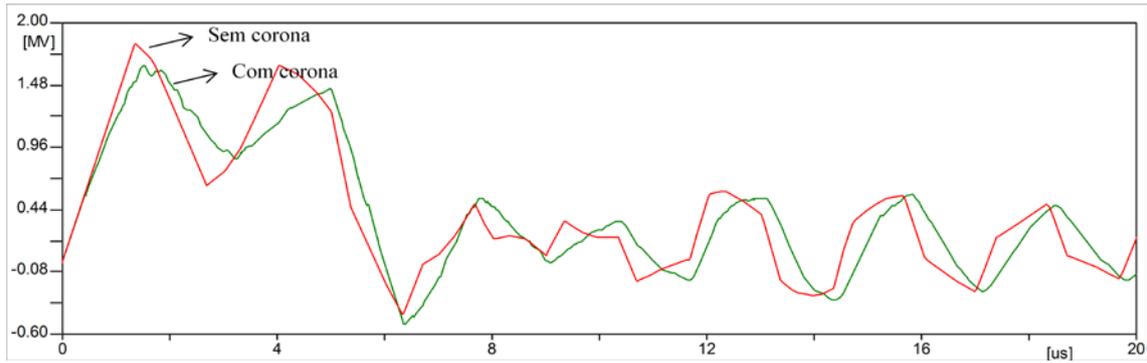


Figura 6-15 - Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 400 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 5  $\mu$ s

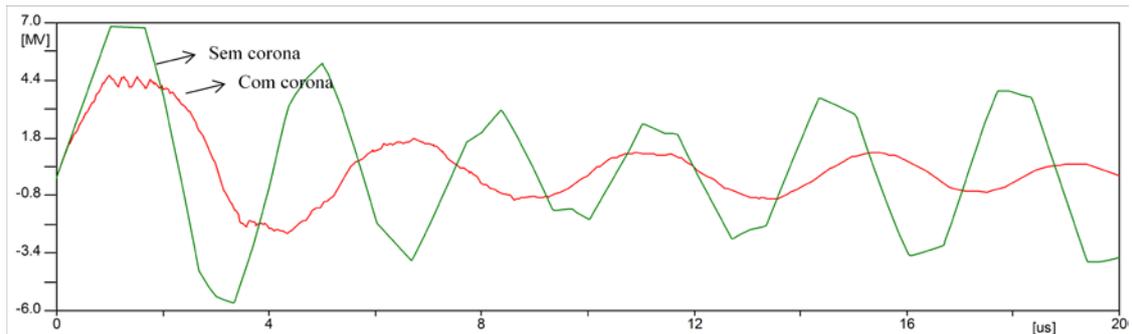


Figura 6-16 - Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 500 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 1  $\mu$ s

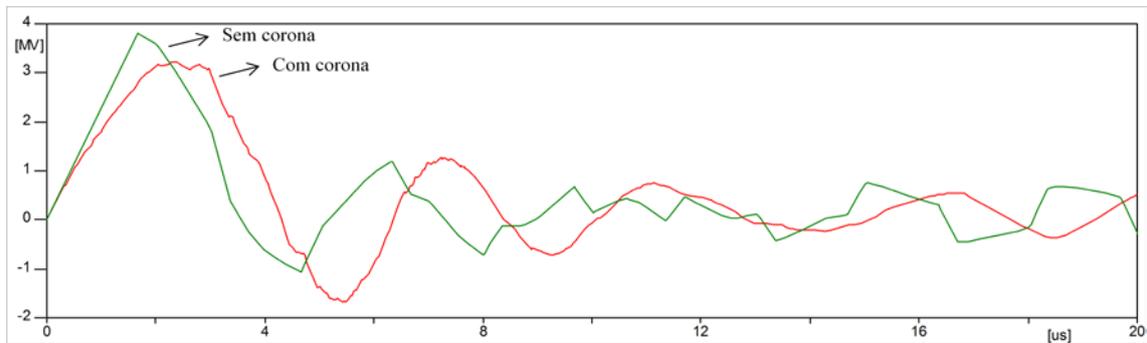


Figura 6-17 - Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 500 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 3  $\mu$ s

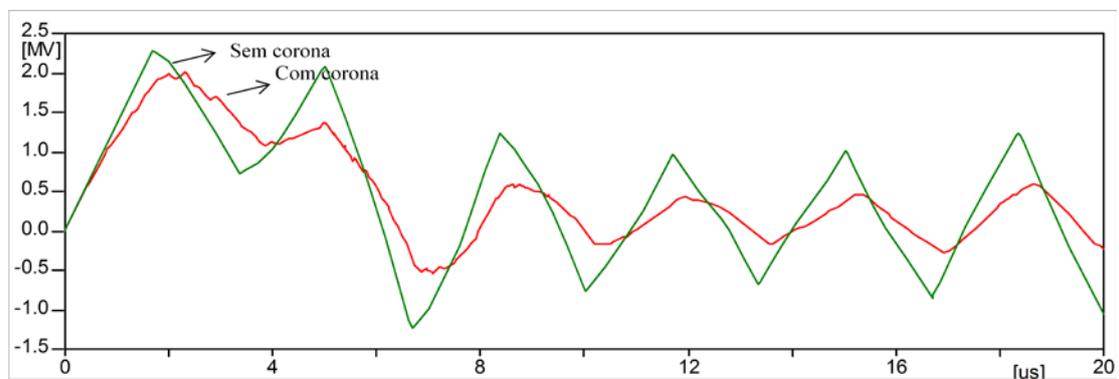


Figura 6-18 - Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 500 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 5  $\mu$ s

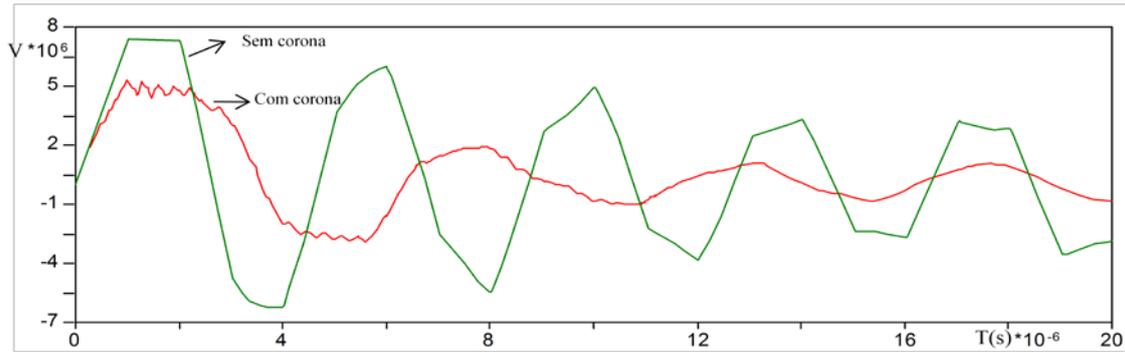


Figura 6-19 - Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 600 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 1  $\mu$ s

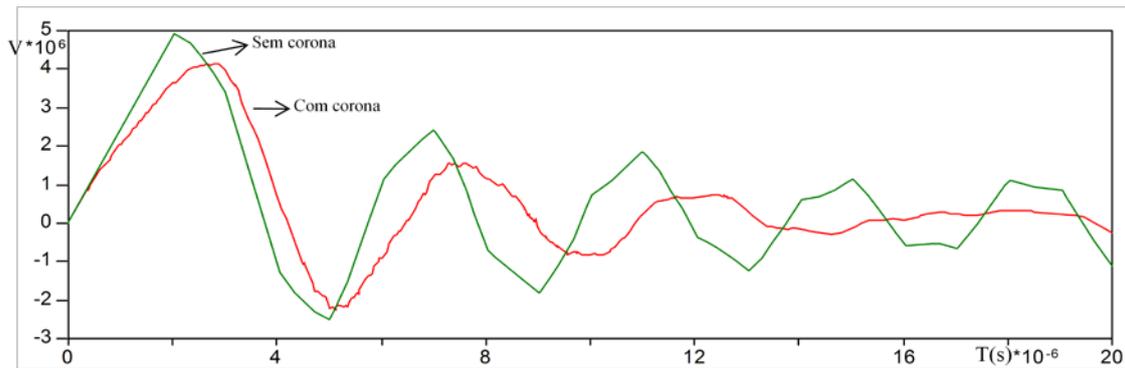


Figura 6-20 - Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 600 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 3  $\mu$ s

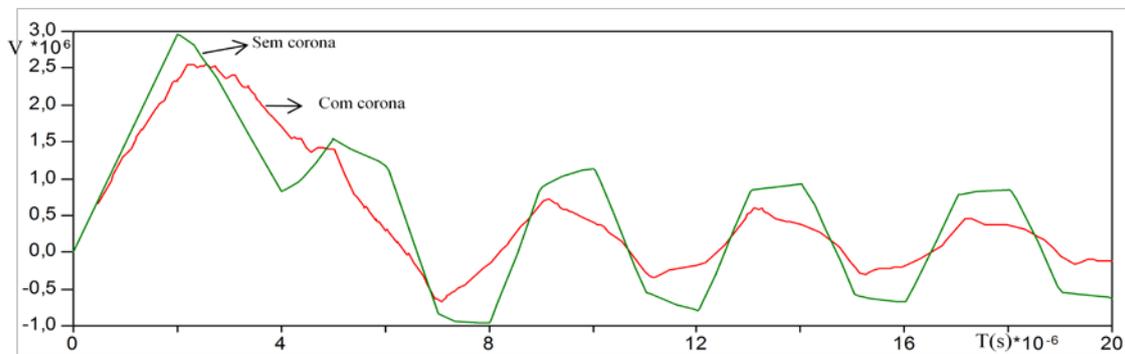


Figura 6-21 - Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 600 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 5  $\mu$ s

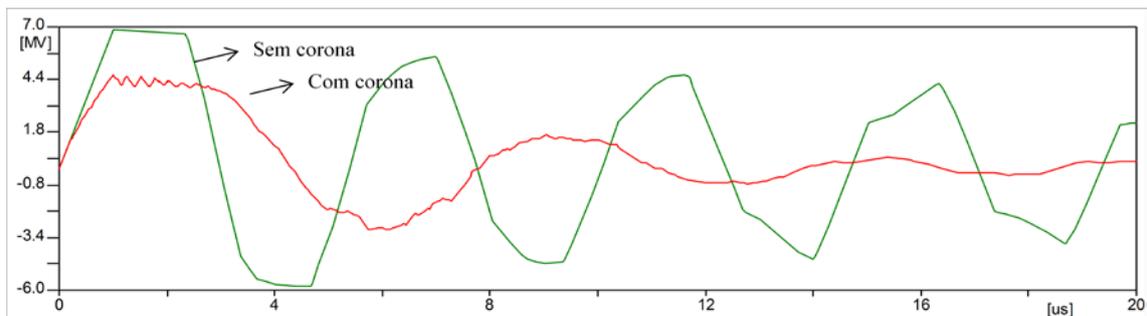


Figura 6-22 - Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 700 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 1  $\mu$ s

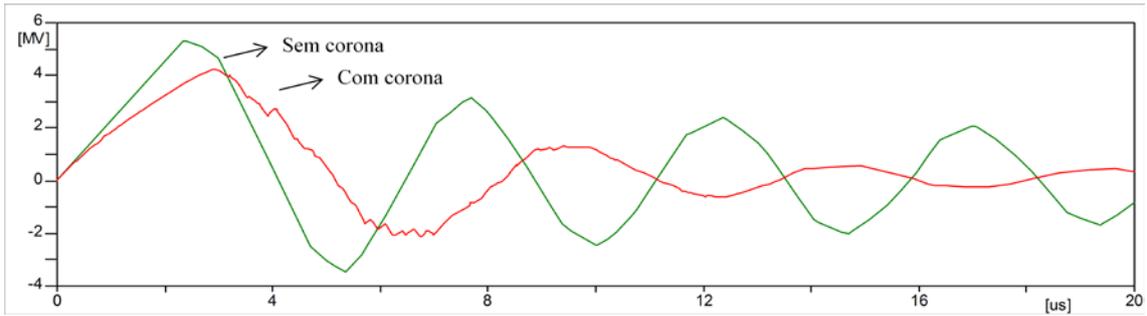


Figura 6-23 - Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 700 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 3  $\mu$ s

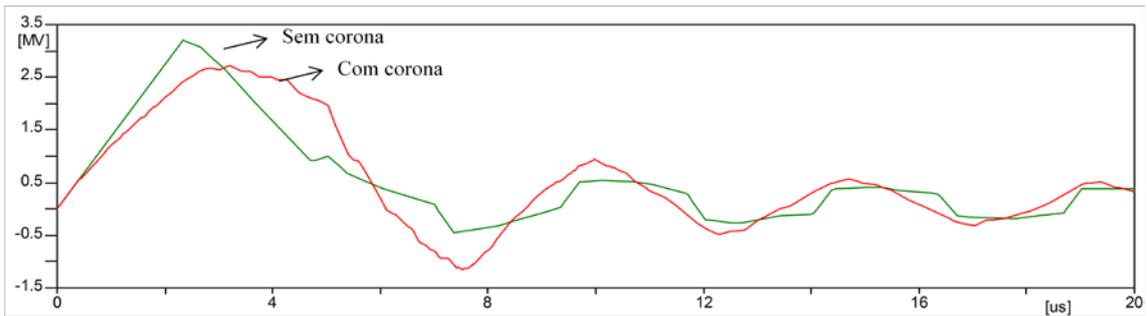


Figura 6-24 - Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 700 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 5  $\mu$ s

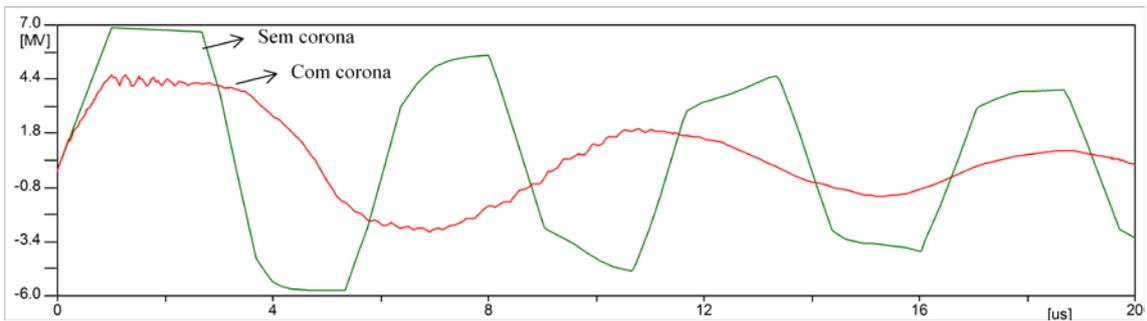


Figura 6-25 – Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 800 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 1  $\mu$ s

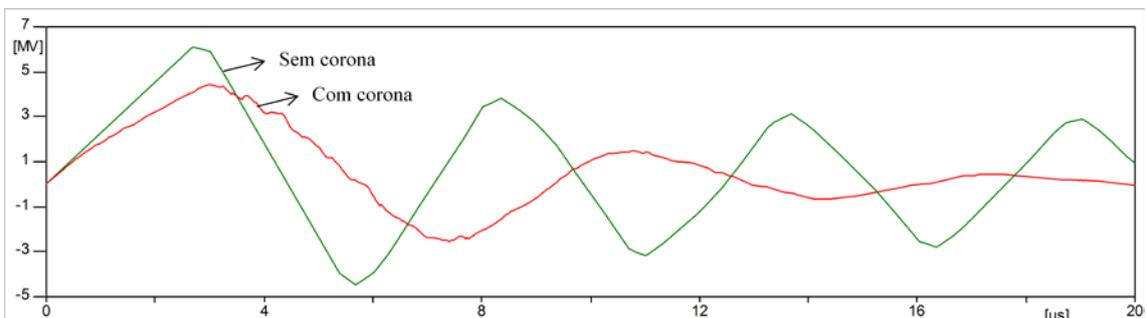


Figura 6-26 - Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 800 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 5  $\mu$ s

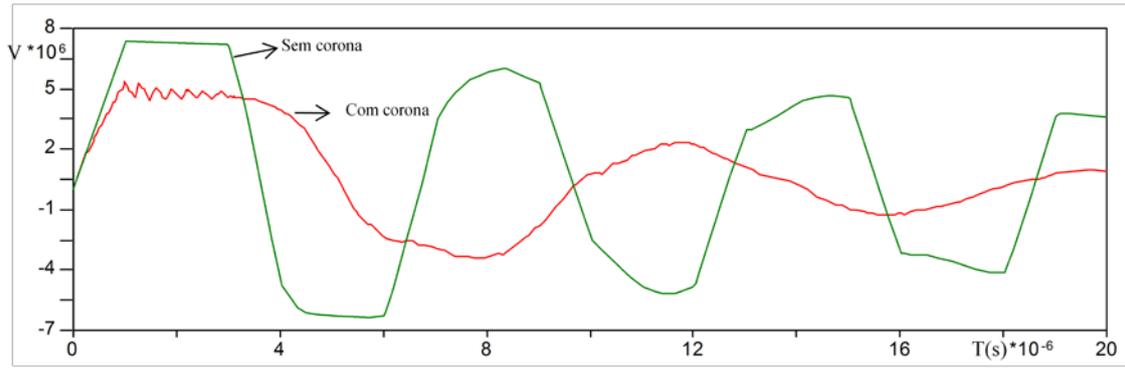


Figura 6-27 – Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 900 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 1  $\mu s$

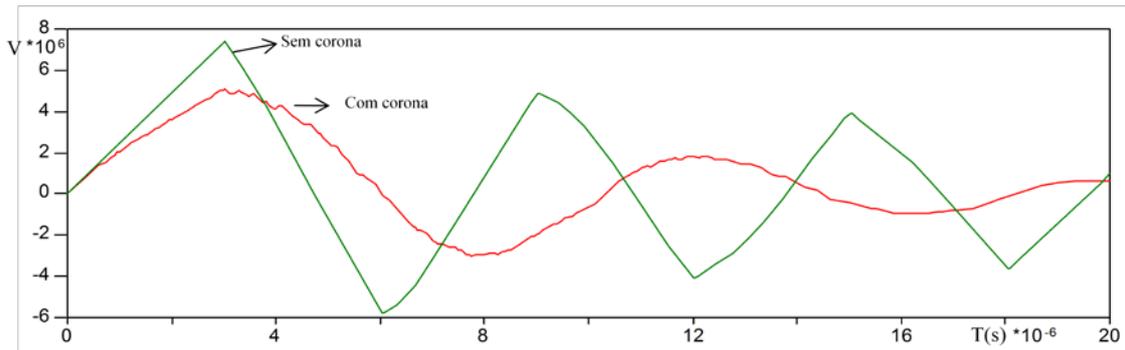


Figura 6-28 – Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 900 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 3  $\mu s$

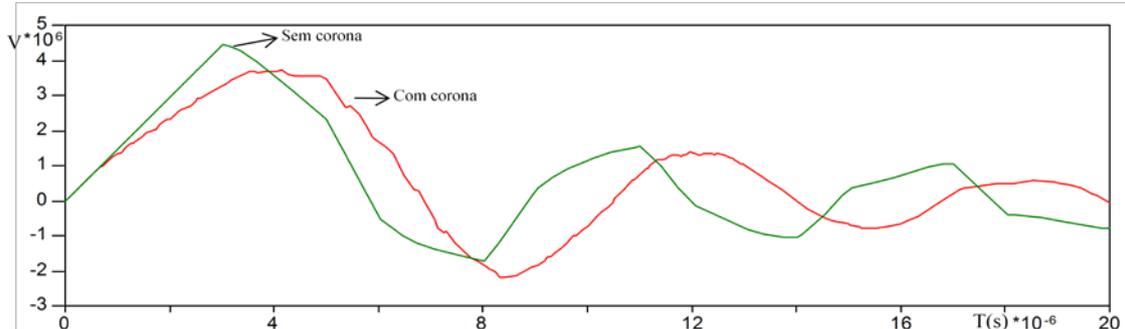


Figura 6-29 – Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 900 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 5  $\mu s$

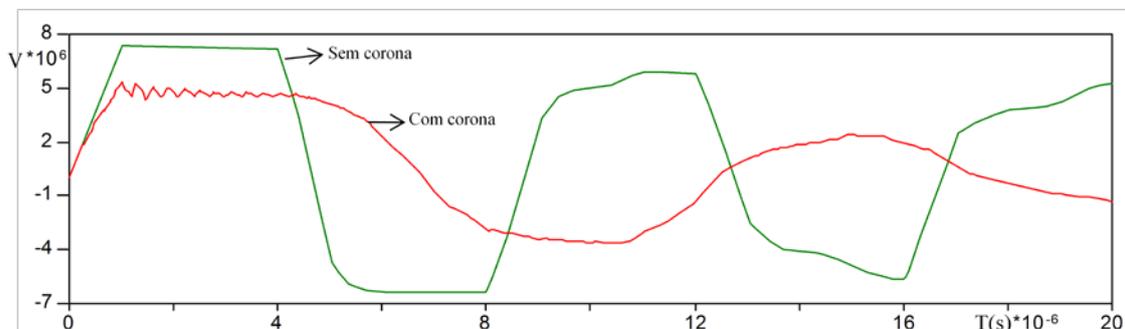


Figura 6-30 – Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 1200 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 1  $\mu s$

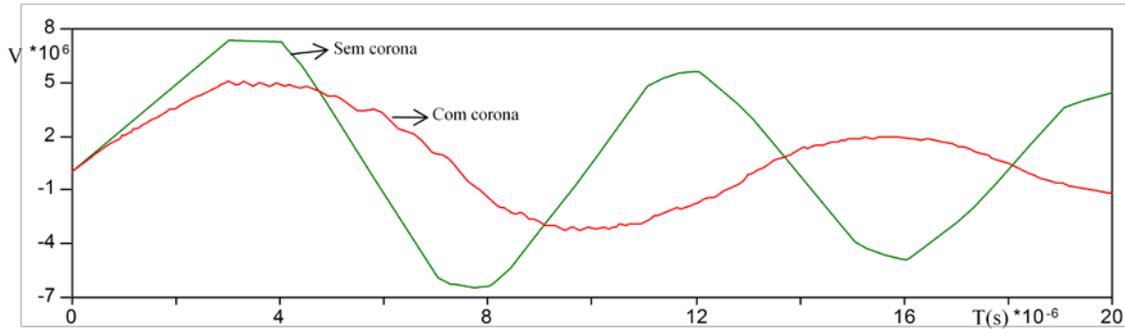


Figura 6-31 – Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 1200 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 3  $\mu$ s

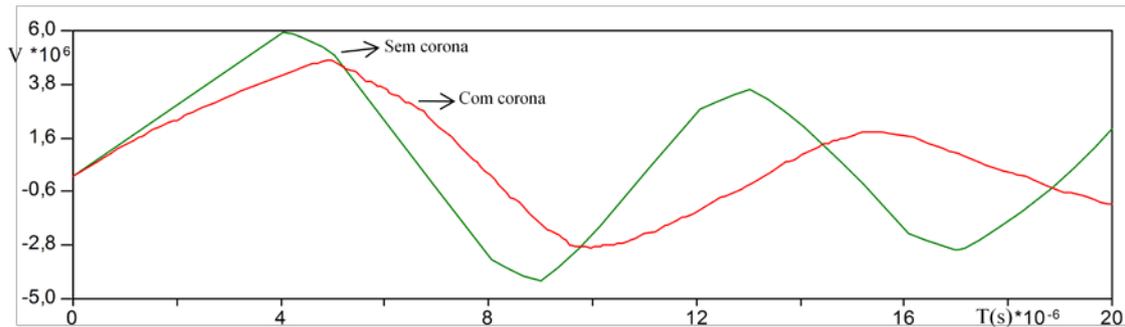


Figura 6-32 – Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 1200 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 5  $\mu$ s

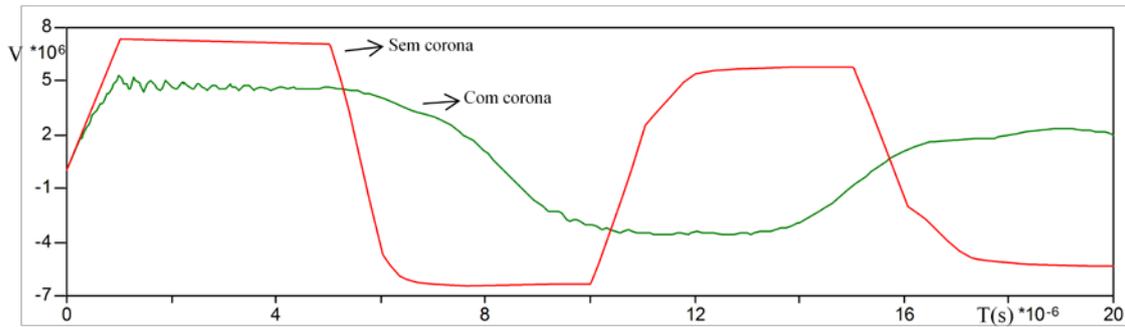


Figura 6-33 – Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 1500 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 1  $\mu$ s

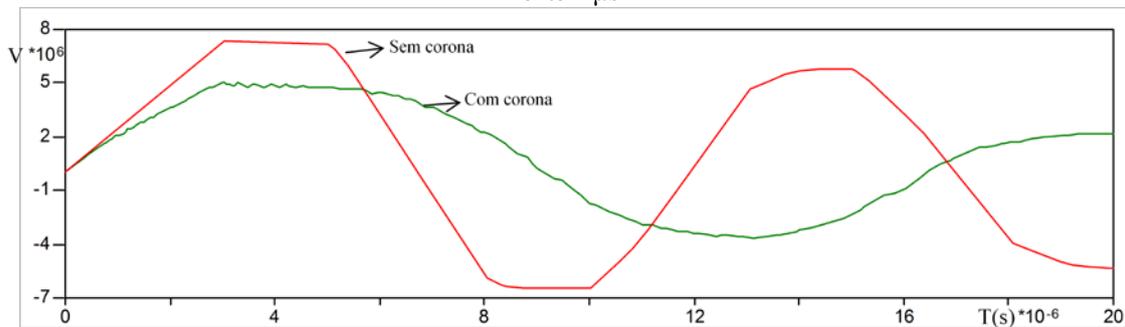


Figura 6-34 – Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 1500 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 3  $\mu$ s

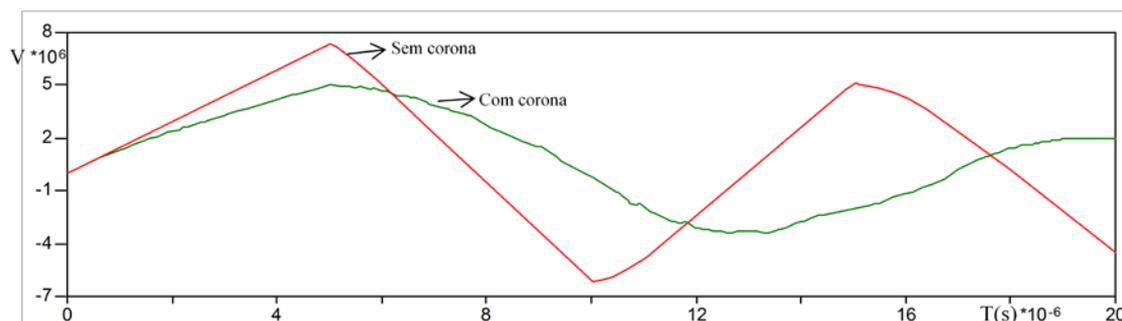


Figura 6-35 – Sobretensão no Ponto de Incidência no Vão de 1500 m. Corrente de 30 kA. Tempo de frente 5  $\mu$ s

As Tabelas abaixo apresentam os resultados obtidos para as sobretensões máximas no ponto de incidência para as simulações realizadas, com e sem inclusão de Efeito Corona.

Amplitude de corrente	t frente	Vão: 400 m		
		V sem corona (kV)	V corona (kV)	Atenuação para
15 kA	1us	3425	2691	78,6%
	3us	1507	1355	89,9%
	5us	908	866	95,4%
30 kA	1us	6851	4595	67,1%
	3us	3031	2605	85,9%
	5us	1817	1644	90,5%
45 kA	1us	10275	6477	63,0%
	3us	4533	3710	81,8%
	5us	2733	2394	87,6%
60 kA	1us	13702	8346	60,9%
	3us	6062	5199	85,8%
	5us	3644	3152	86,5%
75 kA	1us	17125	10085	58,9%
	3us	7537	6584	87,4%
	5us	4535	3926	86,6%

Tabela 6-3 – Sobretensões máximas obtidas no ponto de incidência no meio do vão para comprimento de 400 m

Amplitude de corrente	t <sub>frente</sub>	Vão: 500 m		
		V sem corona (kV)	V corona (kV)	Atenuação para
15 kA	1us	3425	2691	78,6%
	3us	1901	1710	90,0%
	5us	1132	1058	93,5%
30 kA	1us	6850	4616	67,4%
	3us	3801	3231	85,0%
	5us	2279	1983	87,0%
45 kA	1us	10275	6477	63,0%
	3us	5705	4854	85,1%
	5us	3421	2967	86,7%
60 kA	1us	13702	8346	60,9%
	3us	7600	6487	85,4%
	5us	4562	3844	84,3%
75 kA	1us	17128	10086	58,9%
	3us	9504	8103	85,3%
	5us	5700	4806	84,3%

Tabela 6-4 – Sobretensões máximas obtidas no ponto de incidência no meio do vão para comprimento de 500 m

Amplitude de corrente	t <sub>frente</sub>	Vão: 600 m		
		V sem corona (kV)	V corona (kV)	Atenuação para
15 kA	1us	3699	2917	78,9%
	3us	2455	2116	86,2%
	5us	1479	1355	91,6%
30 kA	1us	7398	5292	71,5%
	3us	4919	4142	84,2%
	5us	2953	2540	86,0%
45 kA	1us	11099	7410	66,8%
	3us	7401	6216	84,0%
	5us	4422	3738	84,5%
60 kA	1us	14797	9520	64,3%
	3us	9863	8083	82,0%
	5us	5920	4983	84,2%
75 kA	1us	18496	11427	61,8%
	3us	12331	10023	81,3%
	5us	7394	6235	84,3%

Tabela 6-5 – Sobretensões máximas obtidas no ponto de incidência no meio do vão para comprimento de 600 m

---

Amplitude de corrente	t <sub>frente</sub>	Vão: 700 m		
		V sem corona (kV)	V corona (kV)	Atenuação para
15 kA	1us	3425	2699	78,8%
	3us	2658	2278	85,7%
	5us	1597	1426	89,3%
30 kA	1us	6851	4595	67,1%
	3us	5321	4246	79,8%
	5us	3193	2711	84,9%
45 kA	1us	10277	6490	63,2%
	3us	7988	6147	77,0%
	5us	4792	3962	82,7%
60 kA	1us	13700	8267	60,3%
	3us	10638	7907	74,3%
	5us	6384	5383	84,3%
75 kA	1us	17125	10085	58,9%
	3us	13305	9587	72,1%
	5us	7988	6760	84,6%

Tabela 6-6 – Sobretensões máximas obtidas no ponto de incidência no meio do vão para comprimento de 700 m

Amplitude de corrente	t <sub>frente</sub>	Vão: 800 m		
		V sem corona (kV)	V corona (kV)	Atenuação para
15 kA	1us	3425	2691	78,6%
	3us	3031	2509	82,8%
	5us	1824	1625	89,1%
30 kA	1us	6850	4595	67,1%
	3us	6086	4433	72,8%
	5us	3652	3085	84,5%
45 kA	1us	10275	6427	62,5%
	3us	9077	6312	69,5%
	5us	5455	4519	82,8%
60 kA	1us	13704	8385	61,2%
	3us	12111	8061	66,6%
	5us	7266	6106	84,0%
75 kA	1us	17129	10118	59,1%
	3us	15180	9626	63,4%
	5us	9126	7715	84,5%

Tabela 6-7 – Sobretensões máximas obtidas no ponto de incidência no meio do vão para comprimento de 800 m

---

Amplitude de corrente	t <sub>frente</sub>	Vão: 900 m		
		V sem corona (kV)	V corona (kV)	Atenuação para
15 kA	1us	3699	2907	78,6%
	3us	3695	2823	76,4%
	5us	2822	2219	78,6%
30 kA	1us	7398	5292	71,5%
	3us	7389	5063	68,5%
	5us	4417	3704	83,9%
45 kA	1us	11055	7415	67,1%
	3us	11082	7066	63,8%
	5us	6663	5494	82,5%
60 kA	1us	14797	9482	64,1%
	3us	14785	9116	61,7%
	5us	8833	7436	84,2%
75 kA	1us	18496	11427	61,8%
	3us	18485	11056	59,8%
	5us	11105	9362	84,3%

Tabela 6-8 – Sobretensões máximas obtidas no ponto de incidência no meio do vão para comprimento de 900 m

Amplitude de corrente	t <sub>frente</sub>	Vão: 1200 m		
		V sem corona (kV)	V corona (kV)	Atenuação para
15 kA	1us	3697	2893	78,3%
	3us	3682	2816	76,5%
	5us	2962	2533	85,5%
30 kA	1us	7398	5292	71,5%
	3us	7375	5045	68,4%
	5us	5921	4787	80,8%
45 kA	1us	11055	7416	67,1%
	3us	11098	7066	63,7%
	5us	8886	6861	77,2%
60 kA	1us	14798	9510	64,3%
	3us	14790	9112	61,6%
	5us	11832	8912	75,3%
75 kA	1us	18498	11518	62,3%
	3us	18487	11054	59,8%
	5us	14811	10798	72,9%

Tabela 6-9 – Sobretensões máximas obtidas no ponto de incidência no meio do vão para comprimento de 1200 m

---

Amplitude de corrente	t <sub>frente</sub>	Vão: 1500 m		
		V sem corona (kV)	V corona (kV)	Atenuação para
15 kA	1us	3699	2932	79,3%
	3us	3699	2819	76,2%
	5us	3699	2796	75,6%
30 kA	1us	7399	5327	72,0%
	3us	7399	5045	68,2%
	5us	7394	5017	67,9%
45 kA	1us	11099	7426	66,9%
	3us	11010	7406	67,3%
	5us	11082	7078	63,9%
60 kA	1us	14799	9551	64,5%
	3us	14798	9109	61,6%
	5us	11830	8914	75,4%
75 kA	1us	18498	11518	62,3%
	3us	18498	11049	59,7%
	5us	18495	10826	58,5%

Tabela 6-10 – Sobretensões máximas obtidas no ponto de incidência no meio do vão para comprimento de 1500 m

## 6.5 Análise e Discussões

De acordo com os resultados obtidos no item 6.4, pode-se reafirmar o exposto anteriormente, que a presença do Efeito Corona atenua a amplitude da sobretensão no ponto de incidência à medida que ela se propaga em direção as torres aterradas. A partir dessa conclusão são realizadas aqui análises do ponto de vista desta atenuação, do valor absoluto da sobretensão desenvolvida e por fim da probabilidade de ruptura a meio de vão.

### 6.5.1 Atenuação no Ponto de Incidência

A análise da atenuação da amplitude da sobretensão no ponto de incidência não consiste em uma tarefa simples, pois além da influência da presença do Efeito Corona, a atenuação depende, também, da amplitude da sobretensão desenvolvida, do tempo de frente e do comprimento do vão, o qual determina o tempo retorno da onda refletida nas torres adjacentes ao ponto de incidência.

Os gráficos das Figuras 6-36 a 6-38 auxiliam na análise da influencia da variação dos parâmetros na atenuação da onda. Cada um deles apresenta, para um determinado tempo de frente de onda, o nível de atenuação em função da amplitude da corrente da descarga incidente, para os quatro comprimentos de vão estudados.

---

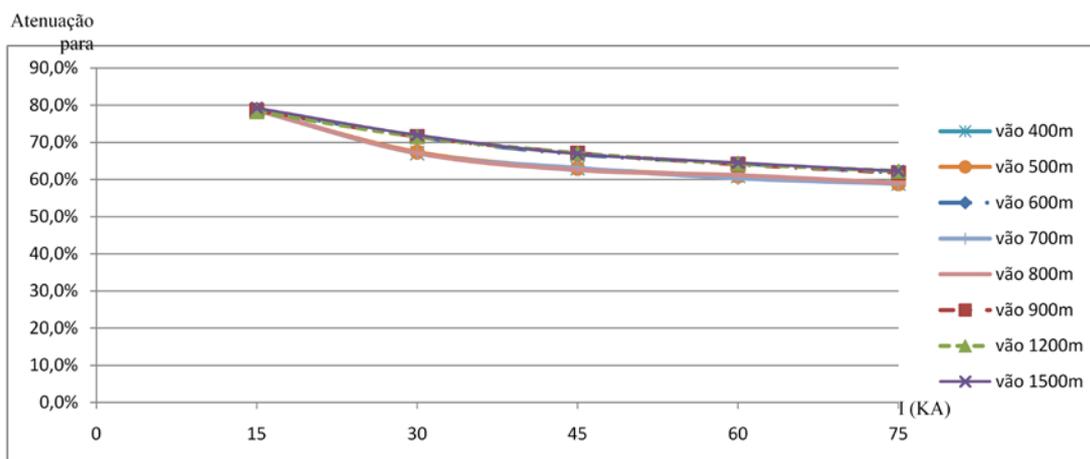


Figura 6-36 – Comparação dos níveis de atenuação da onda com corona em relação a onda sem corona para correntes com tempo de frente de 1 μs

Para as ondas com tempos de frente de 1 μs, os níveis de atenuação para as mesmas amplitudes de descargas foram praticamente iguais para todos os comprimentos de vão. Isto se deve ao fato de que a sobretensão no ponto de incidência para todos os casos atinge seu pico antes da onda refletida retornar. Desta forma, a atenuação da onda com corona em relação à onda sem corona é função apenas da capacitância dinâmica que depende do nível de sobretensão atingido. As ondas são atenuadas para valores entre 60% (75 kA) e 80% (15 kA), sendo a atenuação tanto maior quanto maior a amplitude da corrente da descarga.

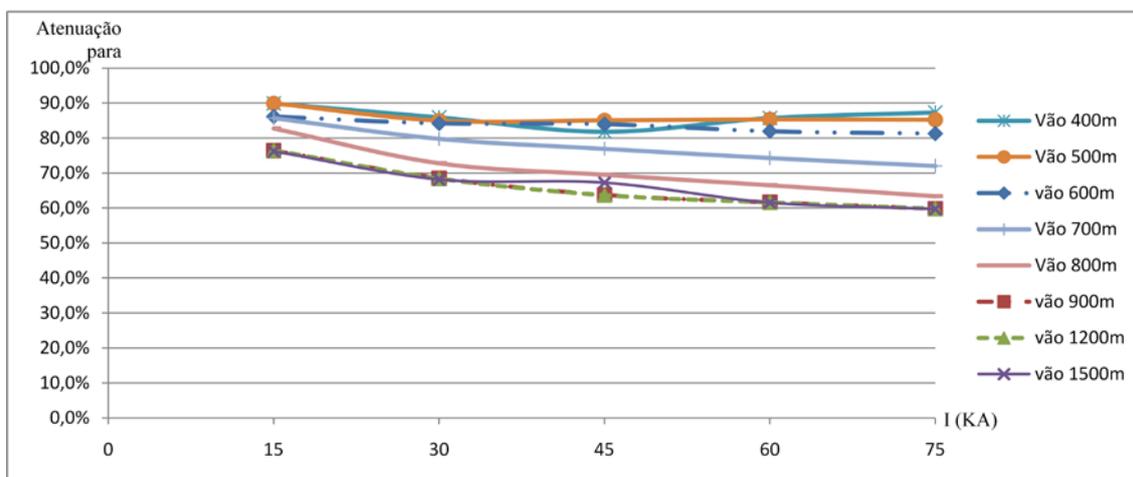


Figura 6-37 – Comparação dos níveis de atenuação da onda com corona em relação a onda sem corona para correntes com tempo de frente de 3 μs

Considerando o caso de onda de corrente com tempo de frente de 3 μs, observa-se que para os vãos mais curtos (400 a 600m) a atenuação foi menor do que para os demais comprimentos de vão. Pode-se observar pela Figura 6-14 que há um “corte” na onda sem Corona em aproximadamente 2 μs (tempo que a onda refletida leva para retornar ao ponto de incidência para este vão). Com a consideração da presença do Corona, há um atraso no retorno da onda que atinge seu pico em aproximadamente 3 μs permitindo o desenvolvimento da onda

completa, conseqüentemente com atenuação menor que no caso dos demais comprimentos de vãos simulados, pois nestes, as ondas refletidas demoram um tempo maior que o tempo de frente para retornar ao ponto de incidência.

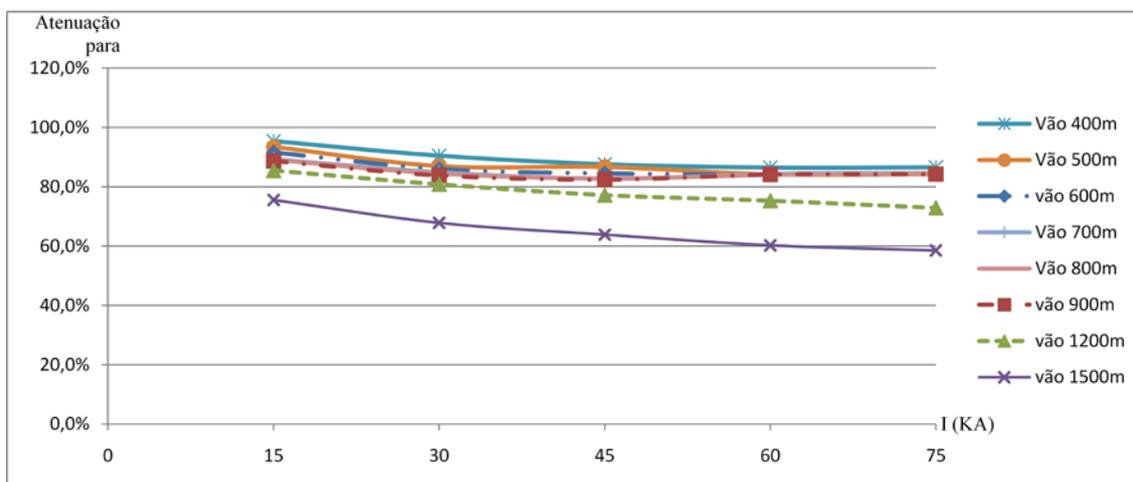


Figura 6-38 – Comparação dos níveis de atenuação da onda com corona em relação a onda sem corona para correntes com tempo de frente de 5  $\mu$ s

No caso das ondas com tempo de frente de 5  $\mu$ s, há uma distinção mais clara das diferentes atenuações obtidas para as mesmas amplitudes de corrente. Confirmando o exposto no parágrafo anterior, pode-se afirmar que, para uma mesma amplitude de onda, entre os tempos de frente de onda simulados, a atenuação da onda de sobretensão com corona em relação à onda sem corona é menor em vãos menores, devido à ocorrência de reflexões antes da onda atingir o pico.

Quando o comprimento do vão é longo o suficiente, o tempo de frente maior permite que a onda se propague por uma maior seção do vão, antes de atingir seu pico no ponto de incidência, injetando as cargas do Efeito Corona no percurso e provocando conseqüentemente uma maior redução da impedância de surto do cabo e logo da tensão resultante desenvolvida. O valor da capacitância dinâmica transversal em decorrência do Efeito Corona é proporcional à sobretensão desenvolvida que é proporcional a corrente da descarga. Logo quanto mais elevada for a amplitude desta corrente, maior é a dimensão da capacitância transversal e da atenuação da sobretensão.

### 6.5.2 Valores Absolutos de Sobretensão no Ponto de Incidência

Como no item anterior, apresenta-se aqui uma análise da amplitude da sobretensão desenvolvida no ponto de incidência considerando a presença de Efeito Corona. Esta análise é importante, pois são estes valores que determinam a probabilidade de ruptura a meio de vão, no caso de incidência de descarga naquele ponto ou proximidades e dele pode se determinar a

amplitude da corrente crítica para ruptura. As figuras de 6-39 a 6-46 ilustram a sobretensão desenvolvida para cada comprimento de vão simulado.

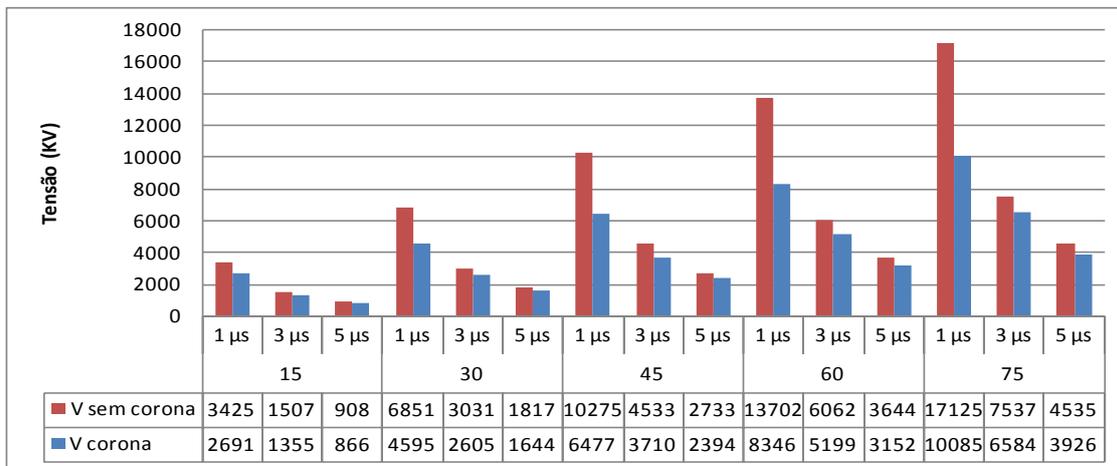


Figura 6-39 – Avaliação da amplitude da sobretensão máxima desenvolvida no ponto de incidência para o vão de 400 m

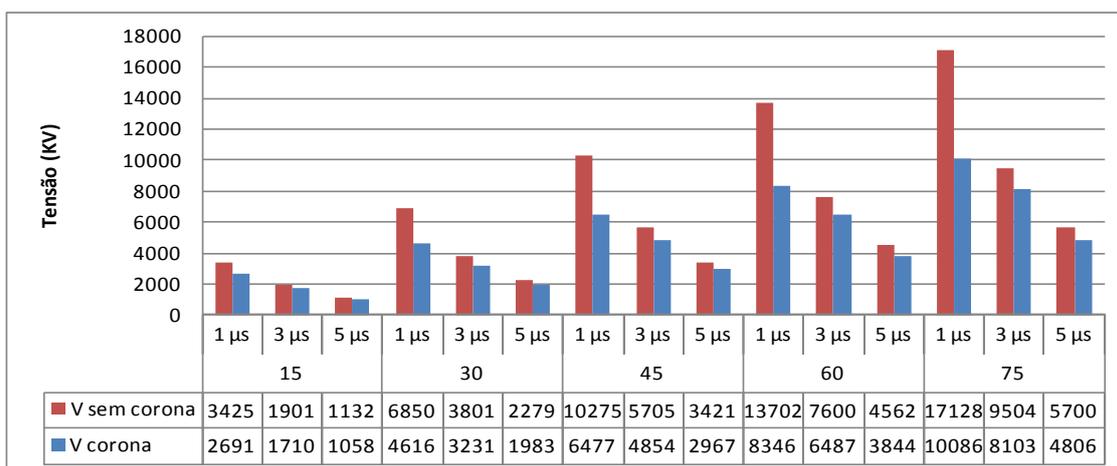


Figura 6-40 – Avaliação da amplitude da sobretensão máxima desenvolvida no ponto de incidência para o vão de 500 m

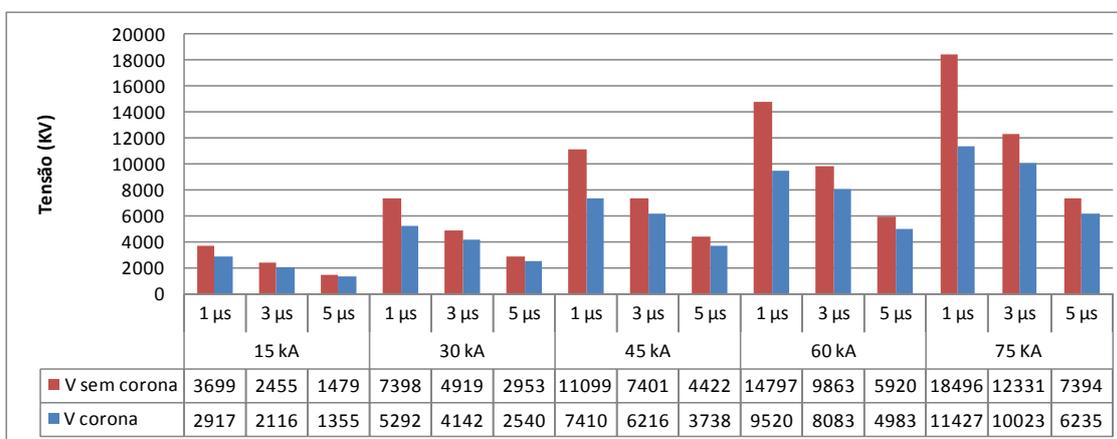


Figura 6-41 – Avaliação da amplitude da sobretensão máxima desenvolvida no ponto de incidência para o vão de 600 m

Pode-se observar que, para os vãos de 400, 500 e 600 m, o valor da sobretensão obtido considerando o Efeito Corona cresce significativamente com o aumento da amplitude da corrente (era basicamente proporcional à corrente na ausência do efeito). A sobretensão é diminuída substancialmente com aumento do tempo de frente da onda, devido ao efeito das reflexões nas torres adjacentes, já discutido no item anterior, tanto na presença quanto na ausência do efeito Corona.

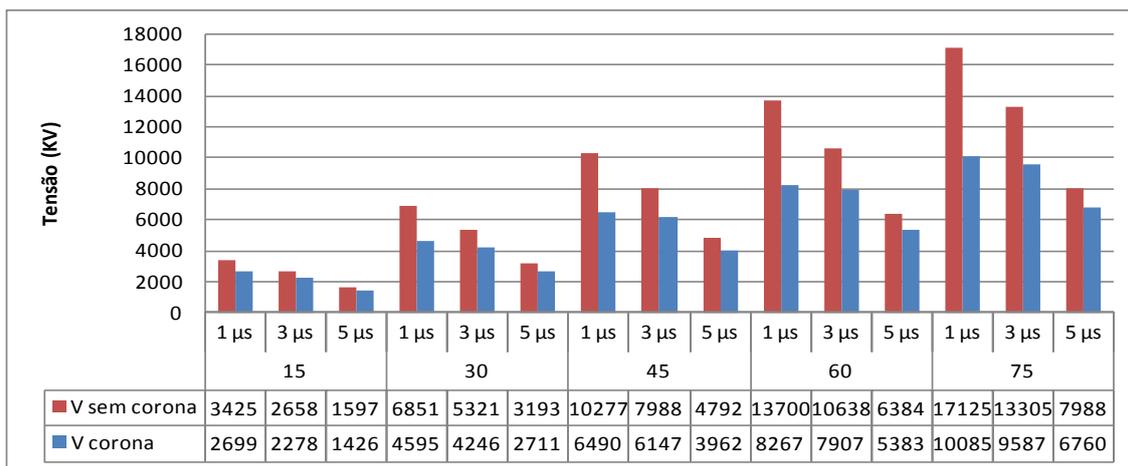


Figura 6-42 – Avaliação da amplitude da sobretensão máxima desenvolvida no ponto de incidência para o vão de 700 m

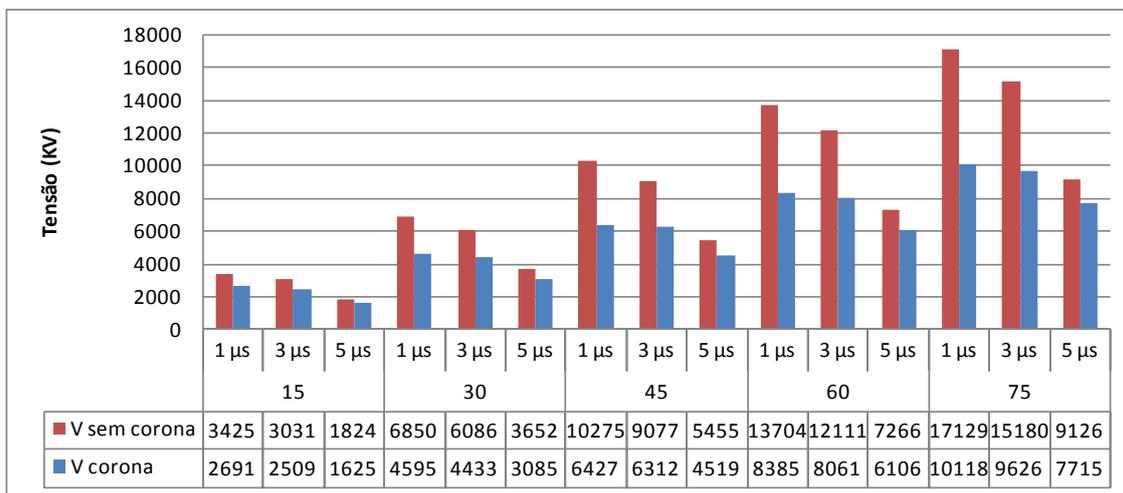


Figura 6-43 – Avaliação da amplitude da sobretensão máxima desenvolvida no ponto de incidência para o vão de 800 m

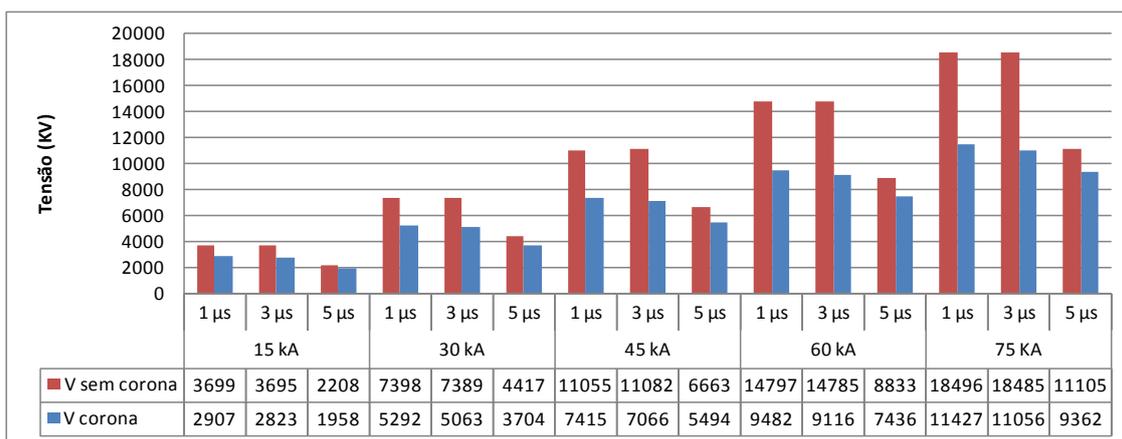


Figura 6-44 – Avaliação da amplitude da sobretensão máxima desenvolvida no ponto de incidência para o vão de 900 m

As amplitudes das sobretensões obtidas nas simulações dos vãos de 700 m, 800 m, 900 m, 1200 m e 1500 m, para ondas de tempos de frente inferiores ao tempo de propagação até as torres adjacentes e retorno, tiveram valores próximos para mesmas amplitudes de corrente aplicadas. No caso dos vãos de 700 m, 800 m e 900 m, pode ser observado que as sobretensões desenvolvidas são praticamente as mesmas do que as obtidas para o vãos de 400 m, 500 m e 600 m, para o tempo de frente de 1 μs.

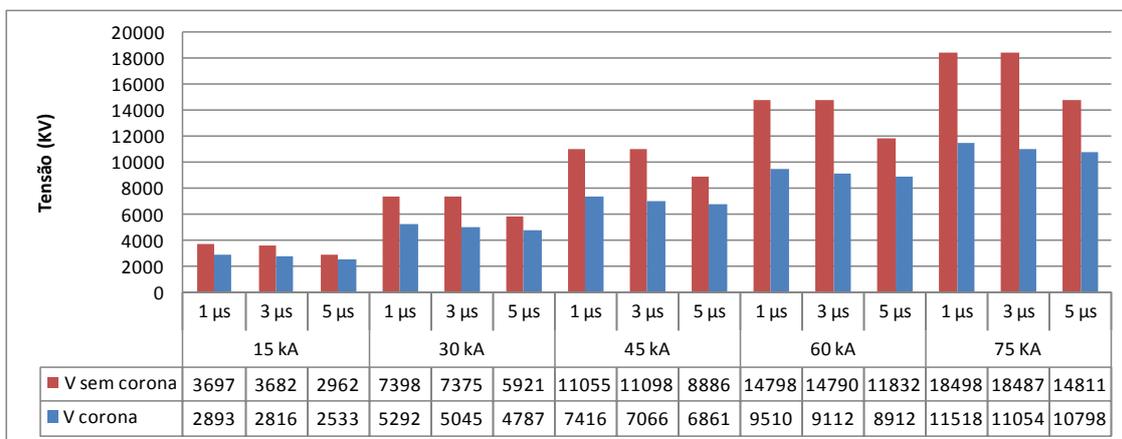


Figura 6-45 – Avaliação da amplitude da sobretensão máxima desenvolvida no ponto de incidência para o vão de 1200 m

As amplitudes das sobretensões obtidas para o vão de 1200 m, são praticamente as mesmas que para os vãos de 700 m, 800 m e 900 m, no caso dos tempos de frente de 1 e 3 μs, e para os vãos de 400m, 500m e 600 m no tempo de frente de 1 μs. No caso do vão de 1500 m, as únicas sobretensões obtidas que tiveram valores diferentes do que para o vão de 1200 m foram as para o tempo de frente de 5 μs.

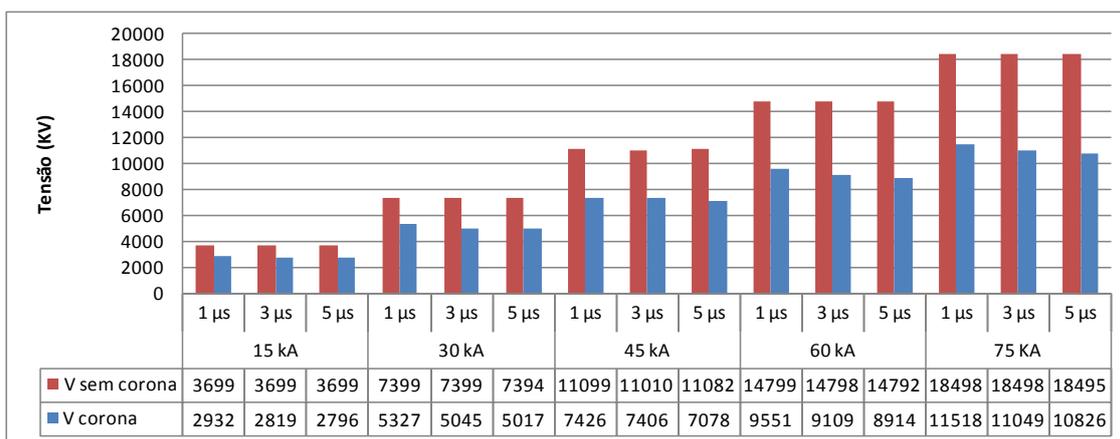


Figura 6-46 – Avaliação da amplitude da sobretensão máxima desenvolvida no ponto de incidência para o vão de 1500 m

Com base na análise realizada pode-se afirmar que na região do meio do vão, se o tempo para retorno da onda refletida ao ponto de incidência for maior que o tempo de frente, haverá um risco de ruptura a meio de vão caso a amplitude da corrente de descarga seja superior ao valor da corrente crítica para ruptura do isolamento. Há de se considerar, também, que o usual aumento da distância entre cabo de blindagem e fase a meio de vão pode reduzir a probabilidade de ruptura.

A Figura 6-46 pode ser utilizada para analisar o desenvolvimento das sobretensões de acordo também com o comprimento do vão.

Da figura 6-46 pode-se tirar a conclusão que se o vão for longo o suficiente, de forma a não haver retorno de ondas refletidas antes da sobretensão atingir seu pico máximo, haverá uma região no meio do vão em que se atingirá a sobretensão máxima independente do ponto de incidência. Considere-se, por exemplo, um tempo de frente de 3 μs. Para vãos mais longos que 900 m, as ondas refletidas não retornam ao ponto de incidência antes da onda atingir seu pico. Isto significa que, para um vão de 1200 m, uma onda de tempo de frente de 3 μs, pode incidir em qualquer lugar numa região de mais ou menos 150 m a partir do centro do vão, que a onda refletida não retornará ao ponto de incidência antes de ser atingida a sobretensão máxima relativa à corrente da descarga incidente. Por isso tem-se o mesmo valor de sobretensão para os vãos de 900 m, 1200 m e 1500 m para este tempo de frente e mesma amplitude de corrente.

Este resultado é condizente com resultados apresentados em (Rocha, L.C, 2009), onde foram obtidos gráficos de tensão máxima para diferentes pontos de injeção da descarga ao longo do vão (de 10% a 90% do comprimento do vão). A Figura 6-47 exemplifica um desses casos, apresentando a sobretensão (em kV / kA) obtida para vários pontos ao longo do vão. Tomando o vão de 800 m como exemplo, pode-se observar que a tensão seria a mesma se a descarga incidisse em qualquer ponto na faixa de 30 a 70% do vão.

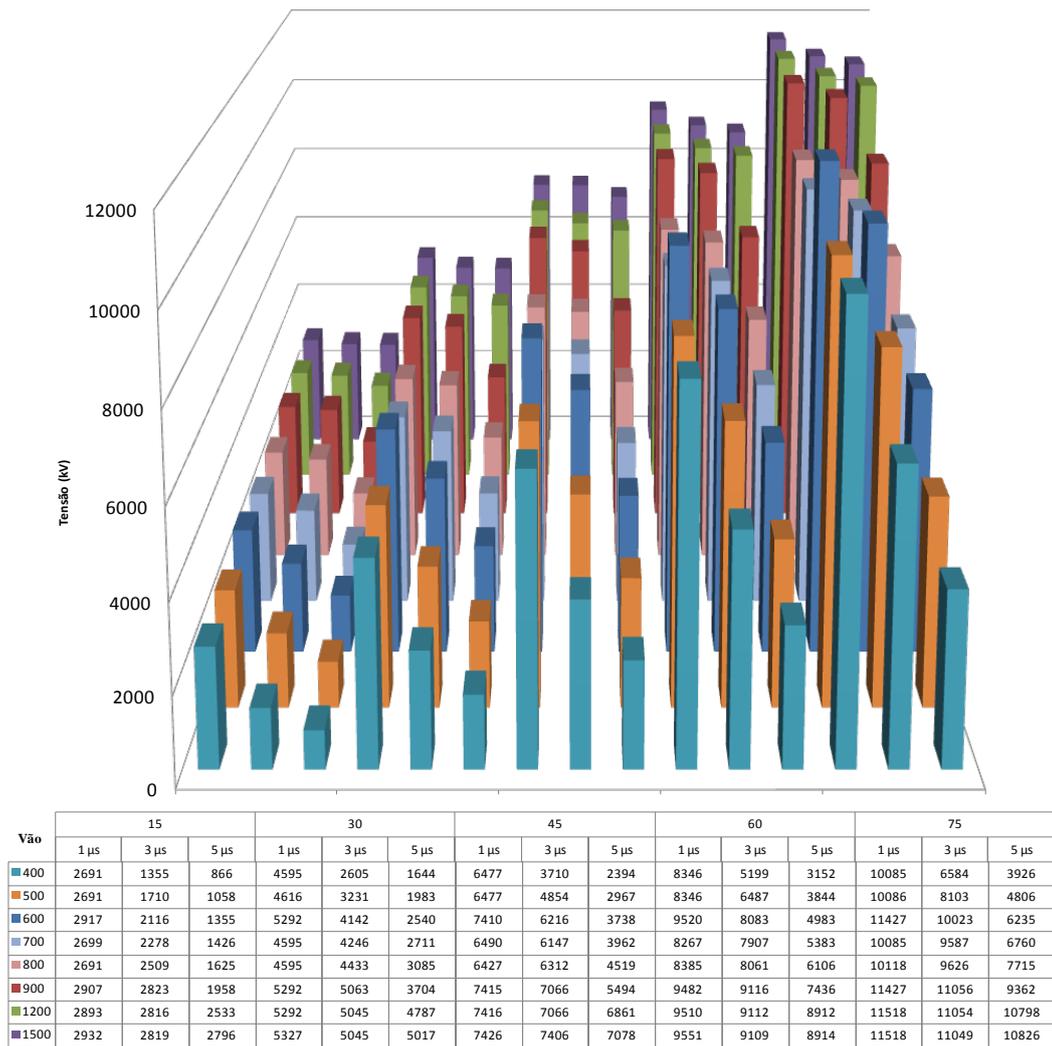


Figura 6-46 – Avaliação das sobretensões máximas desenvolvidas de acordo com o comprimento do vão

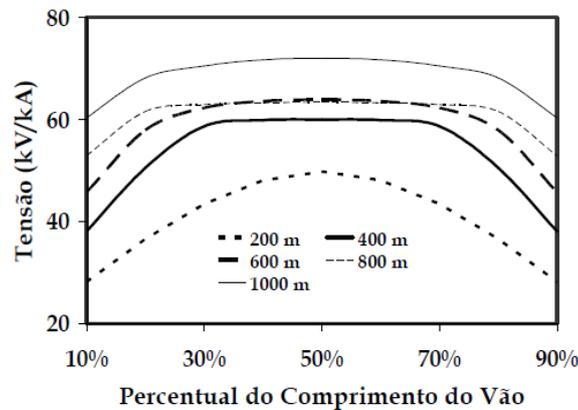


Figura 6-47 – Tensão máxima ao longo do vão. Figura extraída da referência (Rocha, L.C.,2009)

Efetivamente o aumento do vão implica o aumento da sobretensão absoluta. Entretanto, aumenta também a distância entre os cabos, o que tende a reduzir a probabilidade de desligamento.

Com base nos valores obtidos para as amplitudes das sobretensões nos vãos, pode-se afirmar que a presença do Efeito Corona, apesar de atenuar as sobretensões, não elimina a probabilidade de ruptura a meio de vão. No item seguinte é investigada a probabilidade de ocorrência de ruptura a meio de vão considerando os resultados das simulações.

### 6.5.3 Probabilidade de Ruptura a Meio de Vão

Para encontrar a probabilidade de ruptura a meio de vão dos vãos típicos simulados, considerando os níveis de sobretensão atingidos com a inclusão do Efeito Corona, foi calculada a probabilidade acumulada de uma descarga incidente de corrente I ter amplitude superior ao valor da corrente crítica para ruptura da suportabilidade do isolamento no meio do vão. A probabilidade acumulada é dada pela equação 6-12 (IEEE, 1997):

$$P(I_f > I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{I_p}\right)^{2,6}} \quad \text{Equação 6-12}$$

Onde:

$$2 \text{ kA} < I < 200 \text{ kA}$$

$$I_p \text{ é } 31 \text{ kA}$$

O número de *flashes* incididos ao longo da linha por 100 km por ano pode ser obtido pela Equação 6-13 abaixo (EPRI, 1982):

$$N_L = 0,1N_d(b + 4h^{1,09}) \quad \text{Equação 6-13}$$

Onde:

$N_d$  é a densidade de *flashes* por km<sup>2</sup> por ano

h é a altura média do cabo de blindagem

b é a distância entre os cabos de blindagem.

Para cálculo das taxas de ruptura a meio de vão assume-se aqui, que 60% das descargas incidam ao longo do vão e 40% nas proximidades da torre, e que  $N_d$  é igual a 1. A taxa de ruptura a meio de vão por 100 km por ano pode ser obtida pela multiplicação das equações 6-12 e 6-13, conforme indica a equação 6-14.

$$T_{rmv} = 0,06N_d(b + 4h^{1,09}) \times P(I > I_{cr}) \quad \text{Equação 6-14}$$

Onde  $I_{cr}$  é a corrente crítica.

Considera-se, também, o campo elétrico médio crítico igual a 623 kV/m (Udo, 1965). Com base neste valor, foram encontradas as correntes críticas para ruptura dos espaçamentos

---

entre cabos de blindagem e fase mais próxima nos vãos de 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1200 e 1500 m. Essas correntes foram determinadas dividindo-se a suportabilidade do espaçamento pela relação tensão resultante dividida pela corrente injetada. Foram ainda calculadas as probabilidades de ocorrência de descargas dessas magnitudes. Os dados obtidos estão na Tabela 6-11 abaixo para cabos de blindagem comuns e na Tabela 6-12 para cabos do tipo OPGW (*Optical Ground Wire*).

Comprimento do Vão (m)	Espaçamento entre cabos blindagem e fase no meio do vão (m)	Suportabilidade do espaçamento (kV)	Corrente mínima para ruptura com base nas simulações (kA)	Probabilidade de ocorrência da descarga (%)	$N_L$ (/100 km/ano)	$T_{rmv}$ (/100 km/ano)
400	9,5	5891	67,9	11,53%	10,97	0,76
500	10,8	6751	62,7	13,81%	12,18	1,01
600	12,5	7803	57,9	16,44%	13,28	1,31
700	14,5	9046	67,2	11,82%	14,30	1,01
800	16,8	10480	77,8	8,37%	15,26	0,77
900	19,4	12106	97,0	4,90%	16,16	0,48
1200	29,1	18129	126,1	2,54%	18,63	0,28
1500	41,5	25874	179,2	1,03%	20,82	0,13

Tabela 6-11 – Obtenção da taxa de ruptura a meio de vão de acordo com o comprimento do vão para cabos de blindagem convencionais.  $T_f = 5 \mu s$ .

A taxa de ruptura obtida para o cabo de blindagem convencional é menor em vãos curtos (menores que 400 e 500 m), e atinge seu máximo em vãos intermediários de aproximadamente 600 m. Voltam a decrescer à medida que o comprimento do vão vai aumentando. Isto se deve ao fato de prevalecer nos vãos curtos o retorno da onda refletida ao ponto de incidência antes desta atingir seu pico. Nos vãos muito longos o espaçamento é muito grande, elevando, conseqüentemente, a suportabilidade do isolamento.

Comprimento do Vão (m)	Espaçamento entre cabos blindagem e fase no meio do vão (m)	Suportabilidade do espaçamento (kV)	Corrente mínima para ruptura com base nas simulações (kA)	Probabilidade de ocorrência da descarga (%)	N <sub>L</sub> (/100 km/ano)	T <sub>rmv</sub> (/100 km/ano)
400	9,5	5532	63,7	13,31%	10,97	0,88
500	10,8	6191	57,5	16,72%	12,18	1,22
600	12,5	6997	51,9	20,72%	13,28	1,65
700	14,5	7948	59,0	15,80%	14,30	1,36
800	16,8	9046	67,2	11,82%	15,26	1,08
900	19,4	10291	82,4	7,29%	16,16	0,71
1200	29,1	14903	103,6	4,16%	18,63	0,46
1500	41,5	20833	144,3	1,80%	20,82	0,22

Tabela 6-12 – Obtenção da taxa de ruptura a meio de vão de acordo com o comprimento do vão para cabos de blindagem tipo OPGW. Tf = 5 μs.

É importante ressaltar que a distância da fase para o cabo de blindagem no meio do vão é maior quanto maior for o comprimento do vão. A flecha dos cabos pode ser obtida através da seguinte relação:

$$f = \frac{pL^2}{8T} \quad \text{Equação 6-15}$$

Onde:

$p$  é o peso linear (kg/m) do cabo;

$L$  é o comprimento do vão;

$T$  é a tensão de esticamento (kgf) no cabo;

O peso linear do cabo de blindagem é menor que o da fase, assim como o tensão de esticamento. Isto faz com que para vãos maiores a probabilidade de ocorrência de uma descarga com potencial para provocar uma ruptura a meio de vão na linha seja menor. Em contrapartida quando se tem vãos muito curtos, a reflexão da onda nas estruturas próximas provoca o “corte” na onda de sobretensão, não gerando uma sobretensão significativa para ruptura no meio do vão. No caso do cabo do tipo OPGW, este apresenta normalmente um menor tensão de esticamento o

que resulta numa maior flecha, conseqüentemente reduzindo a distância para a fase mais próxima, o que eleva a probabilidade de ruptura a meio de vão.

Com base no resultado das Tabelas 6-7 e 6-8, tomam-se novamente os dados dos trechos considerados críticos da linha de 500 kV utilizada como estudo de caso neste Trabalho, com objetivo de calcular a taxa esperada de rupturas a meio de vão da LT. Os resultados estão apresentados na Tabela 6-13.

Torre	Comprimento do vão posterior (m)	Strokes/km²/ano	Espaçamento (m)	Suportabilidade (kV)	Icr (aprox.) (kA)	P(I>Icr)	Trmv (/100km/ano)	Trmv da LT (/100km/ano)
128	490	4,25	10,68	6657	85	6,71%	0,3439	1,685E-03
129	560	5,49	11,81	7359	83	7,27%	0,5128	2,871E-03
130	560	1,24	11,81	7359	83	7,27%	0,1158	6,486E-04
131	560	1,72	11,81	7359	83	7,27%	0,1606	8,996E-04
132	560	3,81	11,81	7359	83	7,27%	0,3558	1,993E-03
133	560	2,87	11,81	7359	83	7,27%	0,2681	1,501E-03
134	560	1,76	11,81	7359	83	7,27%	0,1644	9,205E-04
135	437	1,28	9,93	6187	89	6,07%	0,0888	3,879E-04
136	438	0	9,94	6195	89	6,08%	0,0000	0,00E+00
137	711	2	14,76	9194	81	7,56%	0,2177	1,548E-03
138	624	2,49	12,98	8084	81	7,52%	0,2535	1,582E-03
139	271	0	8,13	5063	117	3,04%	0,0000	0,00E+00
140	399	2,55	9,44	5883	93	5,49%	0,1534	6,123E-04
141	458	2,24	10,22	6367	87	6,34%	0,1660	7,605E-04
142	584	1,65	12,23	7622	82	7,39%	0,1599	9,336E-04
143	478	2,01	10,51	6546	86	6,58%	0,1577	7,537E-04
144	677	3	14,03	8743	81	7,58%	0,3200	2,166E-03
145	317	0	8,54	5322	105	3,98%	0,0000	0,00E+00
146	421	1,1	9,72	6056	90	5,84%	0,0721	3,036E-04
147	492	2,05	10,71	6675	85	6,73%	0,1667	8,202E-04
261	550	2,79	11,64	7253	83	7,21%	0,2562	1,409E-03
262	394	2,58	9,38	5845	93	5,41%	0,1520	5,990E-04
263	852	4,1	18,14	11302	83	7,11%	0,4584	3,906E-03
264	543	2,79	11,53	7180	83	7,16%	0,2530	1,374E-03
265	598	0	12,49	7780	82	7,45%	0,0000	0,00E+00
266	1100	1,82	25,57	15930	111	3,49%	0,1132	1,246E-03
267	838	2,4	17,78	11075	83	7,17%	0,2685	2,250E-03
268	610	2,49	12,71	7919	82	7,49%	0,2495	1,522E-03
269	465	2,15	10,32	6428	87	6,43%	0,1627	7,565E-04
270	625	0,78	12,99	8096	81	7,53%	0,0795	4,968E-04
271	530	2,81	11,31	7047	84	7,07%	0,2486	1,317E-03
272	240	2,15	7,88	4912	129	2,42%	0,0452	1,085E-04
273	272	1,86	8,14	5068	117	3,07%	0,0524	1,426E-04

274	448	3,22	10,08	6280	88	6,22%	0,2315	1,037E-03
275	452	5,74	10,14	6314	88	6,27%	0,4178	1,888E-03
276	1058	2,87	24,18	15064	105	4,01%	0,2015	2,132E-03
277	799	3,1	16,80	10465	82	7,33%	0,3464	2,768E-03
278	801	1,26	16,85	10496	82	7,32%	0,1408	1,128E-03
279	816	2,47	17,22	10727	83	7,26%	0,2763	2,255E-03
280	1186	1,66	28,59	17810	124	2,63%	0,0809	9,599E-04
320	178	5,45	7,49	4664	165	1,29%	0,0536	9,532E-05
321	480	2,11	10,54	6564	86	6,60%	0,1664	7,987E-04
322	348	1,37	8,86	5519	100	4,59%	0,0647	2,250E-04
323	852	0,59	18,14	11302	83	7,11%	0,0660	5,621E-04
324	208	2,28	7,66	4775	144	1,81%	0,0336	6,994E-05
325	306	2,11	8,44	5256	108	3,76%	0,0770	2,355E-04
326	809	0	17,04	10619	82	7,29%	0,0000	0,00E+00
327	652	1,24	13,52	8426	81	7,57%	0,1297	8,456E-04
328	467	1,54	10,35	6446	87	6,45%	0,1172	5,473E-04
329	668	1,14	13,85	8627	81	7,58%	0,1208	8,069E-04
330	490	1,45	10,68	6657	85	6,71%	0,1173	5,749E-04
331	842	1,73	17,88	11140	83	7,15%	0,1935	1,630E-03
332	908	1,65	19,65	12244	85	6,69%	0,1790	1,626E-03
352	389	1,25	9,32	5808	94	5,33%	0,0721	2,804E-04
353	688	3,66	14,26	8887	81	7,58%	0,3933	2,706E-03
354	160	0	7,39	4606	181	1,01%	0,0000	0,00E+00
355	574	4,29	12,06	7511	82	7,34%	0,4096	2,351E-03
356	804	3,63	16,92	10542	82	7,31%	0,4058	3,263E-03
357	342	5,78	8,80	5479	101	4,47%	0,2639	9,024E-04
358	191	0	7,56	4710	155	1,50%	0,0000	0,00E+00
359	154	0	7,36	4588	187	0,92%	0,0000	0,00E+00
360	82	0	7,10	4425	339	0,20%	0,0000	0,00E+00

Tabela 6-13 – Avaliação da taxa de ruptura a meio de vão de uma LT real de 500kV

Foi obtida a contribuição de cada vão na taxa de ruptura a meio de vão da LT por 100 km por ano. A taxa obtida para todo o trecho, somando-se as contribuições individuais de cada vão para o desempenho da LT (coluna Trmv da LT), foi de 0,192 desligamentos / 100 km / ano. No Capítulo 6 foi calculada através do aplicativo SIGMA SLP a taxa de 0,82 desligamentos por *backflashover* / 100 km / ano que mostrou estar um pouco abaixo da média esperada para a LT. Com o valor aqui encontrado a taxa de desligamentos composta fica mais próxima do esperado de 1,14 desligamentos / 100 km / ano, conforme Capítulo 5, o que mostra a relevância da consideração do fenômeno ruptura a meio de vão neste tipo de avaliação.

### 6.6. Ruptura a meio de vão *Entre Cabo de blindagem e Fases: Influência das Correntes de Pré-ruptura*

A Corrente de Pré-ruptura ou pré-descarga como chamada em (Wagner, 1963), é um mecanismo que ocorre a partir do momento que a tensão crítica para dar início ao processo de *flashover* é atingida.

Segundo Wagner (1963), quando a tensão crítica de ruptura é atingida, canais de plasma com boa condutividade, conhecidos como “*streamers*”, começam a se formar e viajam através do *gap* a partir de ambos os condutores. Conforme Shindo e Suzuki (1985), quando os “*streamers*” cruzam o *gap*, correntes ionizantes se propagam ao longo deles e quando estas atingem a zona de alta condutividade próxima ao eletrodo, o *leader* do canal de ruptura começa a se desenvolver.

Durante o tempo de formação do *leader*, a velocidade de propagação dos canais é tão lenta que os canais individuais têm tempo suficiente para se estabilizar com características de um arco de plasma, para o qual a “queda” ao longo do canal é da ordem de 60volts/cm. Se a tensão aplicada se mantiver alta suficiente, o líder interligará o *gap*, o que faz com que as intensas ondas ionizantes levem à fase de arco através do processo de aquecimento do gás. Se o fluxo das correntes ionizantes de Pré-ruptura provocar a redução do nível de sobretensão abaixo do nível crítico, o líder não se formará por completo e não haverá a disrupção.

Um exemplo apresentado por Wagner (1963) considera um vão de aproximadamente 300m de uma linha monofásica, com distância do condutor fase à mísula da torre de 3,0 m, distância entre cabo de blindagem e fases na torre de 9,0m e de 12,0m no meio do vão. Considere a incidência de uma descarga de amplitude  $I_s$  no ponto “a” meio do vão do cabo de blindagem, conforme Figura 6-48 abaixo:

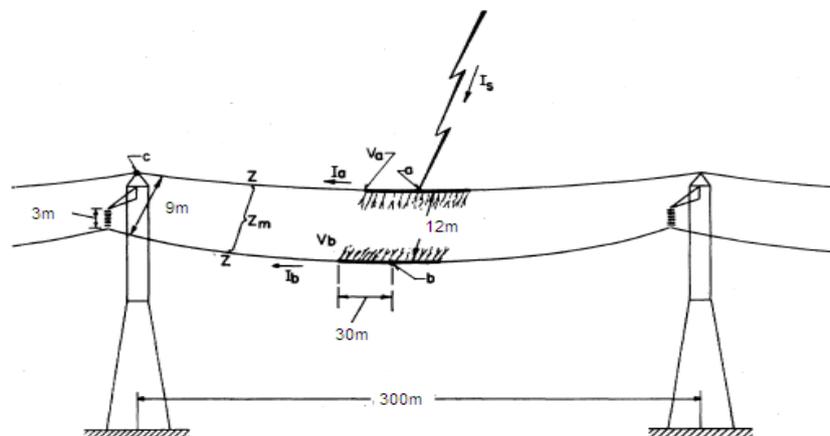


Figura 6-48 – Diagrama esquemático para representar o efeito das Correntes de Pré-ruptura quando da incidência de descargas no meio do vão (Adaptado de (Wagner, 1963))

Enquanto a corrente da descarga aumenta, a tensão associada no ponto a do cabo de blindagem também aumenta. Enquanto o “*leader*” descendente se aproxima da terra, cargas de polaridade oposta são induzidas nos condutores. O efeito resultante da superposição das cargas induzidas pelo *leader* e as produzidas pela corrente injetadas na terra é indefinido mas, para ser conservativo, assume-se que os efeitos das ondas refletidas dos pontos aterrados nas torres chegam ao meio do vão em menos de 3 $\mu$ s. Por simetria, a corrente  $I_s$  divide-se igualmente no ponto a, com metade da corrente se deslocando para cada lado. No ponto b, equivalente ao ponto a, mas no condutor fase, a corrente é zero. Wagner (1963) assume “grosseiramente” que apenas os primeiros 30,0m do cabo de blindagem e da fase de cada lado do ponto de incidência desenvolvem os canais condutivos discutidos no parágrafo anterior. Para a esquerda do ponto a, a corrente  $I_a$  flui no cabo de blindagem e a corrente  $I_b$  no condutor fase. Seja  $Z$  a impedância de surto do cabo de blindagem e também do condutor e  $Z_m$  a impedância de surto mútua. A tensão  $V_a$  do de blindagem e  $V_b$  do condutor podem ser obtidas pelas seguintes equações:

$$V_a = ZI_a + Z_m I_b \quad \text{Equação 6-16}$$

$$V_b = ZI_b + Z_m I_a \quad \text{Equação 6-17}$$

E a diferença de potencial entre os condutores:

$$V_a - V_b = (Z - Z_m)I_a - (Z - Z_m)I_b \quad \text{Equação 6-18}$$

$$I_a = \frac{V_a - V_b}{(Z - Z_m)} + I_b \quad \text{Equação 6-19}$$

Para cada lado do ponto de incidência, correntes fluem pelo canal de ruptura entre o cabo de blindagem e o condutor. A integral das correntes que fluem na seção onde se formam os canais é igual a  $I_b$ . De forma similar,  $I_a = I_s/2 - I_b$ . Então:

$$I_s / 2 = I_a + I_b \quad \text{Equação 6-20}$$

Inserindo a equação 6-20 na equação 6-19:

$$I_s = \frac{2(V_a - V_b)}{(Z - Z_m)} + 4I_b \quad \text{Equação 6-21}$$

Assumindo  $Z = 400\Omega$  aproximadamente e  $Z_m = 0,3*400 = 120\Omega$ , então:

$$I_s = \frac{(V_a - V_b)}{140} + 4I_b \quad \text{Equação 6-22}$$

Onde os valores  $V_a - V_b$  e  $I_b$  podem ser obtidos pelas Figuras 6-49 e 6-50 abaixo, obtidas por Wagner experimentalmente:

---

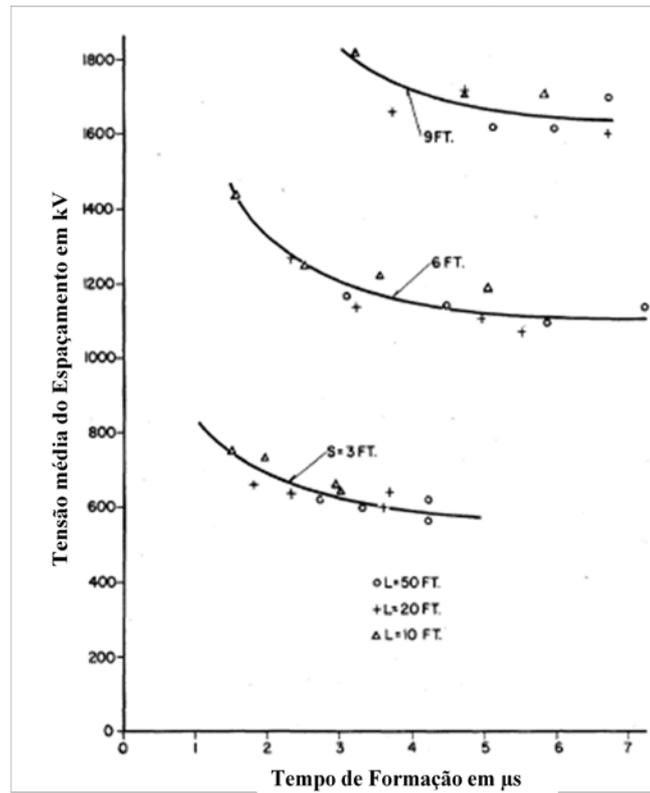


Figura 6-49 – Tensão de formação de *leaders* pelo tempo de formação proporcional ao espaçamento do *gap* (Wagner, 1963)

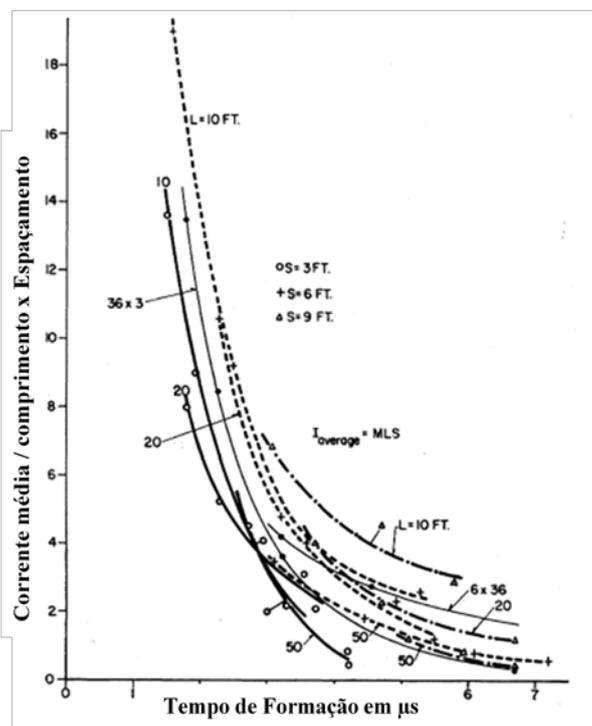


Figura 6-50 – Correntes pré-descarga por espaçamento e comprimento do *gap* em função do tempo de formação do líder (Wagner, 1955)

Para um *gap* com espaçamento entre condutores de 1,8 m, comprimento do eletrodo de 15,0 m e tempo de formação de 3  $\mu$ s, a corrente média do canal é 1100 A e a tensão do *gap* é 1200 kV. Rateando esses valores para um espaçamento como o descrito para este exemplo, com base nas Figuras 6-9 e 6-10:

$$I_s = \frac{8.000.000}{140} + 4 \times 14.700 = 116.000A \quad \text{Equação 6-23}$$

Segundo Wagner (1963), para o exemplo simplificado anterior, para uma descarga com corrente menor que 116 kA, se a onda refletida retornar ao meio do vão em menos de 3  $\mu$ s, não haveria ruptura pois o potencial do cabo de blindagem seria reduzido a praticamente zero. Segundo a lógica do exemplo acima, para valores reais de linhas de transmissão de extra-alta tensão seria praticamente impossível a ocorrência de um *flashover* a meio de vão, pois como os espaçamentos são maiores grande parte da corrente da descarga seria transferida para o condutor fase através do mecanismo das Correntes de Pré-ruptura.

Com base no exemplo dado por Wagner alguns questionamentos podem ser levantados. O primeiro é sobre um efeito que não é levado em consideração: que a impedância mútua de surto  $Z_m$ , considerado fixo no exemplo depende dos parâmetros transversais da linha, logo, a medida que o “*leader*” se forma, diminuindo a distância entre os cabos de blindagem e a fase mais próxima, o valor de  $Z_m$  também se reduz. Se for assumido, apenas para fim de exemplificação, que a impedância mútua de surto reduz para 1/3 do valor usado no exemplo (120 $\Omega$ ), a corrente necessária para fechamento do arco seria:

$$I_s = 2 \cdot \frac{8.000.000}{400 - 40} + 4 \times 14.700 = 103kA \quad \text{Equação 6-24}$$

Considera-se o resultado da simulação abaixo para o vão de 600m, amplitude da corrente da descarga atmosférica de 60 kA e 3microsegundos de tempo de frente e incluindo Efeito Corona.

Os pontos da Figura 6-37 marcados com um círculo, determinam a faixa de tempo na qual a tensão no ponto de incidência permanece acima da tensão crítica de ruptura para esse ponto aproximadamente 7,6 kV.

---

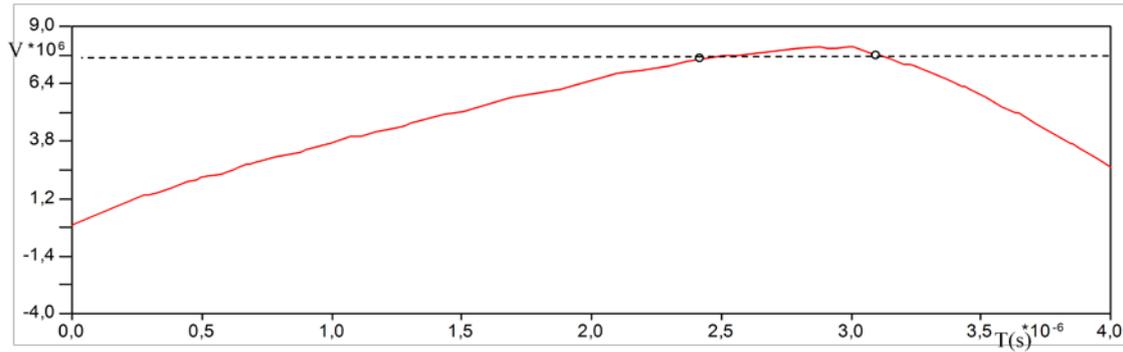


Figura 6-37 – Faixa de tempo em que a sobretensão permanece com valor superior ao crítico para ruptura

A partir de  $2,4 \mu s$  no ponto de incidência é atingido a tensão crítica de ruptura. Neste momento começam a se formar os *streamers* e passa a fluir a Corrente de Pré-ruptura atenuando a sobretensão naquele ponto. Todavia, apenas na proximidade do ponto onde a sobretensão máxima foi atingida, ou seja, no ponto de incidência, ocorreu também a sobretensão com nível acima do crítico e conseqüentemente com formação de *streamers*. Por outro lado também, a medida que os *streamers* se formam e o líder começa a se propagar pelos canais, a sobretensão necessária para ruptura também é reduzida.

O exemplo de Wagner (1963) aqui analisado apresenta uma abordagem simplificada para representação do meio do vão que leva em conta algumas simplificações, como por exemplo, a consideração da impedância mútua de surto constante durante a propagação do *leader* no gap e a redução da tensão suportável do isolamento a medida que os *streamers* se formam aproximando o cabo atingido da fase mais próxima. Faltam, portanto, análises consubstanciadas para poder concluir se o fenômeno exemplificado realmente é capaz de mitigar a ruptura a meio de vão.

Para se realizar uma análise mais apropriada para avaliar o impacto das Correntes de Pré-ruptura na probabilidade de ruptura a meio de vão, poderia, por exemplo, ser criado um modelo para o *flashover*, em que na modelagem da propagação do *leader* através do gap, as Correntes de Pré-ruptura representassem elementos de desaceleração da velocidade de propagação do *leader*. Se a desaceleração provocada pelas correntes de pré-ruptura fosse suficiente para cessar a progressão do *leader* entre os cabos, não haveria *flashover*. Mas, caso essas não fossem capazes de desacelerar a propagação do *leader*, haveria a disrupção. Esse tipo de modelagem é utilizada em (Shindo, 1985) para gaps do tipo *haste-haste*. No caso aqui estudado, o modelo teria que ser desenvolvido para representar gaps do tipo *cabo-cabo*;

# 7 Conclusões e Propostas de Continuidade

## *7.1 Introdução*

No cenário atual em que tanto os clientes das empresas concessionárias quanto os órgãos fiscalizadores exigem maiores disponibilidade, confiabilidade e qualidade da energia, procura-se cada vez mais alternativas não-convencionais eficazes para avaliação de desempenho de linhas de transmissão.

Devido ao grande número de descargas atmosféricas que ocorrem ano a ano e provocam desligamentos em linhas de transmissão, este fenômeno natural requer estudos mais profundos sobre suas características e sobre sua influência em sistemas, de forma que eles possam estar adequadamente protegidos para não sofrerem falhas por sua interferência.

Neste contexto, este trabalho teve como objetivo apresentar uma contribuição aos estudos de desempenho de linhas de transmissão de extra-alta tensão frente a descargas atmosféricas, particularmente no que concerne ao fenômeno ruptura a meio de vão. Este é normalmente desconsiderado em metodologias e *softwares* de simulação de desempenho de linhas de transmissão. O trabalho desenvolve com interesse especial a consideração do Efeito Corona e das Correntes de Pré-ruptura neste fenômeno.

O estudo recorreu a um caso prático para o desenvolvimento de suas considerações ao abordar a situação de uma linha de transmissão real de 500 kV, cujos resultados de simulações

de modelagem convencional não apresentavam resultados condizentes com o desempenho efetivo da linha. Isto conferiu às avaliações um caráter mais próximo da realidade de aplicação.

## **7.2 Resultados Desenvolvidos**

### **7.2.1 Conclusões Gerais**

Neste texto foram estudados os aspectos que influenciam diretamente no desempenho de linhas de transmissão com foco em linhas de transmissão de extra-alta tensão.

Sobre a classificação dos tipos de desligamento apresentada, conclui-se que este é um importante aspecto de um estudo de desempenho, para que se possa avaliar as medidas preventivas ou corretivas necessárias para redução da frequência de desligamentos da linha e conseqüente melhoria do seu desempenho. No caso de desligamentos por descarga, é importante aprofundar na compreensão dos potenciais fenômenos causadores dos desligamentos, pois estes podem não ser provocados simplesmente por valor de resistência de aterramento elevado, como é normalmente assumido pelas empresas do Setor Elétrico.

Por meio do estudo dos parâmetros que mais impactam no desempenho de linhas, foi possível observar a relação intrínseca de alguns parâmetros com trechos da linha que apresentam desligamentos, como por exemplo, a relação do relevo com a densidade de descargas e a relação de parâmetros climatológicos como umidade do ar com a suportabilidade do isolamento do ar. Conclui-se que o conhecimento dessas características também é importante quando da investigação dos prováveis mecanismos que estão provocando desligamentos por descarga na linha.

Em relação à investigação das características da linha de 500kV estudada como exemplo neste texto, foi observada significativa correlação entre os dados de descargas atmosféricas obtidos no LLS e os dados de desligamento obtidos no localizador de faltas. Nos trechos da linha onde houve reincidência de desligamentos constatou-se correlação com trechos que apresentaram resistências de aterramento elevadas, mostrando que alguns dos desligamentos poderiam ser atribuídos a ocorrências de *backflashover*. Para confirmar este aspecto foram realizadas simulações com o aplicativo SIGMA SLP.

Através dessas simulações foi possível avaliar os trechos críticos da linha com reincidência de desligamentos. Por outro lado, vale destacar que tal aplicativo não leva em consideração a possibilidade de ocorrência do fenômeno ruptura a meio de vão, a presença de Efeito Corona e a existência de Correntes de Pré-ruptura. Apesar de indicar que de fato havia

---

ocorrências por *backflashover* na linha, provavelmente devido às estruturas com valor de resistência de aterramento elevado, o resultado das simulações com o SIGMA SLP divergiu significativamente da taxa real de desligamentos da linha. Isto sugere que a consideração do fenômeno ruptura a meio de vão poderia ser importante para se obter uma estimativa mais precisa da taxa de desligamentos de uma linha em uma simulação.

### ***7.2.2 Conclusões sobre a Ruptura a Meio de Vão considerando Efeito Corona e Correntes de Pré-Ruptura***

Com relação ao efeito corona foi realizado um estudo teórico sobre o seu processo formativo e sua influência na atenuação e distorção de ondas de sobretensão propagadas em linhas de transmissão. Pode-se concluir com base nesse estudo que o efeito corona é um importante parâmetro de influência, sobretudo no fenômeno ruptura a meio de vão, pois se considera reduzida sua relevância como condicionador da ocorrência de *flashover* e *backflashover*.

Foi desenvolvido um estudo sobre a evolução dos modelos de corona publicados nas últimas décadas e alguns desses modelos foram simulados para avaliação de adequabilidade para o estudo do caso de ruptura a meio de vão. Conclui-se, com base no estudo realizado, que os modelos de Efeito Corona tem se tornado cada vez mais precisos. Existem, inclusive, modelos mais detalhados para avaliação de tensão induzida em cabos próximos ao cabo atingido pela descarga. Já é possível escolher um modelo de Efeito Corona para aplicação de acordo com a necessidade do estudo.

Com base no modelo dinâmico de Efeito Corona, foram realizadas simulações com vãos reais da linha de 500 kV considerada neste trabalho para verificar a probabilidade de ocorrência de ruptura a meio de vão. Concluiu-se que para vãos muito longos acima de 1000m, devido ao grande espaçamento do vão, a corrente necessária para ruptura torna-se cada vez mais improvável. Da mesma forma em vãos menores que 600m, o tempo menor para reflexão da onda na estrutura e retorno ao ponto de incidência faz com que não se atinja a sobretensão mínima para ruptura a meio de vão ou que seja necessária uma corrente de amplitude muito elevada para tal. Considera-se também que o fenômeno de ruptura a meio de vão é relevante e não deve ser desprezado nas simulações de desempenho. Este fenômeno pode ser computado por meio de uma modelagem similar à utilizada nesse trabalho.

Com relação às Correntes de Pré-ruptura, foi avaliado o exemplo clássico da literatura que descarta a possibilidade de ruptura a meio de vão devido a este fenômeno. Conclui-se pela análise realizada e pelos questionamentos realizados acerca da modelagem utilizada no

---

exemplo, que não é possível afirmar com certeza que as Correntes de Pré-ruptura eliminam a possibilidade de ruptura no meio de vão. Para avaliar corretamente são necessários modelos de transitórios adequados que levem em consideração a presença dessas correntes após a sobretensão ultrapassar o valor crítico de ruptura, os quais não são contemplados pela literatura clássica que apresenta a afirmativa acima.

### ***7.3 Proposta de Continuidade***

Para abordar adequadamente o desempenho de linhas de transmissão de extra-alta tensão, recomenda-se que sejam desenvolvidas ferramentas dedicadas para simulação de desempenho de linhas que considerem o fenômeno ruptura a meio de vão e também a presença do Efeito Corona na propagação das sobretensões.

Com relação às Correntes de Pré-ruptura propõe-se que sejam criados modelos de propagação de *leader*, que considerem a existência dessas correntes, por exemplo, como elementos desaceleradores da propagação do *leader* no espaçamento entre os condutores. Com esses modelos implementados em aplicativos de cálculo de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas, será possível avaliar quantitativamente a probabilidade de ruptura a meio de vão e os valores mínimos de amplitude de corrente de descarga para provocar esse tipo de desligamento, considerando todos os parâmetros de influência envolvidos.

Finalmente, acerca dos estudos de desempenho recomenda-se que as empresas do setor elétrico invistam em sistemas de monitoramento que possam apresentar como resultado dados atualizados das linhas para avaliação de seu desempenho. Estes devem se capazes de realizar análises de correlação de dados como, por exemplo, dados de sistemas de localização de descargas, localizadores de faltas e de detecção de queimadas, além de sistemas georreferenciados que tenham registrados outros dados importantes como valor da resistência ou impedância de aterramento, comprimento dos vãos, densidade de descargas. É interessante também estudar formas de garantir que estes dados sejam sempre atualizados e que sejam definidas metodologias para logística de medição de resistência de aterramento e estudos de custos que demonstrem a relação custo-benefício da melhoria de linhas que apresentem baixo desempenho, considerando a perda de receita por Parcela Variável e outras penalidades dos órgãos reguladores.

---

# Referências Bibliográficas

ABNT NBR 5419 – “Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas”, agosto, 2005.

ALMEIDA, D. R., “Um Novo Modelo de Representação da Corrente de Retorno do Canal e da Torre de Medição para Estudos de Contaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas”, Dissertação de Mestrado, Orientador: Visacro S., LRC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, 2002.

ANEEL, “Resolução Normativa nº 270 de 26 de junho de 2007”, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2007.

BERGER, K., ANDERSON, R. B., KRÖNINGER, H., “Parameters of Lightning Flashes” em *Electra*, 41, pp. 23–37, 1975.

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.

CARNEIRO, S. JR., MARTI, J. R., “Evaluation of Corona and Line Models in Electromagnetic Transients Calculations”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No. 1, pp. 334-342, January, 1991.

CEMIG, 30.936-OT/PL1-0229B, “LT Neves-Mesquita 500kV - Instrução para o Aterramento das Torres”, Janeiro, 1979.

CEMIG, *Características Básicas de Linhas de Transmissão*, Gerência de Engenharia de Manutenção da Transmissão – PN/MT, Consulta realizada em julho de 2010.

CERQUEIRA, J.L., “Avaliação Experimental sobre o Efeito de Ionização do Solo devido à Injeção de Correntes Impulsivas”, Dissertação de Mestrado, Orientador: Visacro S., LRC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, 2008

CIGRE WG 33.01, “Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines”, CIGRE Technical brochure no 63, October 1991

CONTI, A. R., “Modelos para Definição de Ondas de Corrente e Tensão Representativas das Solicitações de Sistemas de Distribuição por Descargas Atmosféricas”, Tese de Doutorado, Orientador: Visacro S., LRC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, 2006.

CONTI, A. R., VISACRO, S., “Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms”, em IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol.49, no.2, 2007.

---

- CORREIA DE BARROS, M.T., “*Identification of the capacitance coefficients of multiphase transmission lines exhibiting corona under transient conditions*”, Power Delivery, IEEE Transactions on Volume: 10 , Issue: 3 , July, 1995
- DARVENIZA, M., SARGENT, M. A., “*The calculation of double circuit outage rate of transmission lines*” IEEE Trans. Power Applicat. Syst., vol. PAS-88, no. 5, pp. 680–687, May 1969.
- DIAS, R.N., “*Aplicações do SLT em Proteção Elétrica: Constituição de Base de Dados para Análise de Incidência de Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão*”, Dissertação de Mestrado, Orientador: Visacro S., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Julho, 2002.
- DIAS, R.N., “*Nova Metodologia para Identificação de Pontos Críticos em Linhas de Transmissão Baseada na Aplicação de Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas*”, Tese de Doutorado, Orientador: Visacro S., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dezembro, 2006.
- 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.
- EPRI, “*Handbook for Improving Overhead Transmission Line Lightning Performance*” - Final Report, December 2004.
- ERIKSSON, A. J., “*Lightning and tall structures*” em Trans. South African IEEE, 69, 1978.
- 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. 1987.
- 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.
- FONSECA, E. M. B., OLIVEIRA, D. B. F., REZENDE, A. P. S., “*Controle de queimadas sob linhas de transmissão, subtransmissão e distribuição de energia*”, Revista Ação Ambiental, Ano II, nº 12, pp 22-27, Universidade Federal de Viçosa, Jun. 2000.
- GARY, C., CRITESCU, D., DRAGAN, G., “*Attenuation of travelling waves caused by corona*”, CIGRE Report 33-13, 1978.
- GARY, C., CRITESCU, D., DRAGAN, G., “*Attenuation and Distortion of Travelling Waves Caused by Transient Corona*”, Cigré Study Committee 33, Brochure 55, 1989.
- GALLAGHER, T.J., DUDURYCH, I.M., “*Model of corona for an EMTP study of surge propagation along HV transmission lines*”, Generation, Transmission and Distribution, IEEE Proceedings-Volume: 151 , Issue: 1, pp 61-66, January, 2004.
- GREENWOOD, A., “*Electrical Transients in Power Systems - Second Edition*”, Livro, John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- IEEE, “*Guide for Improving Lightning Performance of Transmission Lines*”, IEEE Standard 1243, 1997.
-

KUDYAN, H. M., SHIH, C. H., "A Nonlinear Circuit Model for Transmission Lines in Corona", IEEE Trans., Vol. PAS-96, pp. 102-115, February, 1977.

LEUVEN, K.U. "Alternative transient program (ATP)rule book" EMTP Centre, 2004.

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.

MARUVADA, P.S., MENEMENLIS, H., MALEWSKI, R., "Corona Characteristics of Conductor Bundles under Impulse Voltages", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, pp. 102-115, Jan./Feb. 1977.

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.

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

MESQUITA, C.R., "Investigação de Sistemas de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas", Dissertação de Mestrado, Orientador: Visacro S., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Junho, 2001.

MESQUITA, C.R., "Nova Metodologia para Calibração de Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas", Tese de Doutorado, Orientador: Visacro S., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dezembro, 2006.

MESQUITA C. R., DIAS, R. N., VISACRO, S. CAZETTA F., "Lightning Parameters Obtained by LLS in MG State: Analyses and Discussion", em Proc. of International Conference on Ground and Earthing & International Conference on Lightning Physics and Effects (Ground 2006 & 2nd LPE), 2006.

MIRANDA, D.C., CUNHA, L. V; MESQUITA, C. R; DIAS. R. N; VISACRO, S.V., "Resultados da Aplicação de Metodologia Inovadora para Melhorar o Desempenho da LT Guilman Amorim – Ipatinga 1, 230 Kv, Frente a Descargas Atmosféricas", XIX SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Outubro 2007.

NAIME, A. L. F., "Contribuição ao Estudo dos Erros dos Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas: Proposta de Antena de Medição Indireta de Corrente de Retorno", Dissertação de Mestrado, Orientador: Visacro S., LRC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, 2001.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico – Módulo 2: "Padrões de Desempenho da Rede Básica e Requisitos Mínimos para suas Instalações" – Aprovado pela ANEEL em 05/08/2009, pela Resolução Nº 372/09, Norma Técnica, 2009.

PEEK, F. W., "Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering", 1st edn, Gallaher Press, 2007

PEREIRA, C., SILVEIRA, E. G., "Transmission Line Fault Location Algorithms Using One Terminal Quantities". GROUND'2002 - International Conference on Grounding and Earthing & 3rd WAE Brazilian Workshop on Atmospheric Electricity, 2002, p. 319-322, Rio de Janeiro, 2002.

- ROCHA, L. C., *Desempenho de Linhas de Transmissão EAT e UAT Frente a Descargas Atmosféricas: Influência da Ruptura a Meio de Vão*, Dissertação de Mestrado, Orientador: Visacro S., LRC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, 2009.
- ROCHA, A.C., CUNHA, L. V., CHERCHIGLIA, L.C.L, MOREIRA, S. O., DE FRANCO, J.L., “*Application of Line Surge Arrester on a 230 kv Transmission Line Cemig’s Experience*”, GROUND’2008, Florianópolis, SC, November 2008.
- RODRIGUES, M.G; PORTELA, C.; “*Influência da Orografia de uma Região na Distribuição de Descargas Atmosféricas*”, XVI SNPTEE – GSC/001, Outubro 2001.
- ROSADO, G. C., “*Investigação teórico-experimental sobre a resposta de Aterramentos Elétricos frente a correntes de Descargas Atmosféricas*”, Dissertação de Mestrado, Orientador: Visacro S., LRC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, 2008.
- PEREIRA, C. E. M; ZANETTA, L.C.; “*Análise Comparativa de Alguns Algoritmos de Localização de Faltas em Linhas de Transmissão*” – SBA Controle e Automação, Vol.11 N° 3, Dezembro 2000.
- SADOVIC, S., “*SIGMA SLP - Version 2.1 Software For The Determination Of Transmission And Distribution Line Electrical Performance – User Manual*”, France, December, 2006.
- SADOVIC, S., WAHAB, Y.A., ABIDIN, Z.Z., “*Line surge arrester application on the quadruple circuit transmission line*”, Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, Vol.3, 2003.
- SANTIAGO, N.H.C, “*Atenuação de Surtos em Linhas de Transmissão devido ao Efeito Corona*”, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 1987.
- SANTIAGO, N.H. C., PORTELA, C. M., “*Modelagem do Efeito Corona em Linhas de Transmissão considerando Interação entre Fases ou Pólos e Cabos Pára-raios*”, XI SNPTEE Seminário Nacional de Produção E Transmissão de Energia Elétrica , Rio de Janeiro, 1991.
- SARGENT, M. A., DARVENIZA, M., “*The Calculation of Double Circuit Outage Rate of Transmission Lines*” IEEE Trans. Power Applicat. Syst., vol. PAS-88, no. 5, pp. 680–687, May 1969.
- SCHROEDER, M. A. O. “*Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas*”, Tese de Doutorado, Orientador: Visacro S., LRC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, 2001.
- SHINDO, T., SUZUKI, T., “*A New Calculation Method of Breakdown Voltage-Time Characteristics of Long Air Gaps*”, Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on Volume: PAS-104 , Issue: 6 , pp. 1556 – 1563, 1985.
- SILVA, A. P., “*Melhoria de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas: Desenvolvimento de Sistema de Informações e Análise de Casos*”, Dissertação de Mestrado, Orientador: Visacro S., LRC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, 2007.
- SILVA, M., “*Localização de Faltas em Linhas de Transmissão utilizando a Teoria de Ondas Viajantes e Transformada Wavelet*”, Dissertação de Mestrado, Orientador: Coury, D.V., Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 2003.

SILVEIRA, F. H., “*Modelagem para Cálculo de Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas*”, Tese de Doutorado, Orientador: Visacro S., LRC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, 2006.

SILVINO, J. L., MESQUITA, C. R., VISACRO, S., “*Non-direct lightning current measurement for lightning location systems calibration*” em *Electronics Letters*, v. 39, n. 6, 2003.

SKILLING, H. H., DYKES, P. DE K. , “*Distortion of Traveling Waves by Corona*”, *AIEE Transactions (Electrical Engineering)*, vol 56, pp. 850-57, July, 1937.

SOARES Jr, A., “*Investigação do Comportamento dos Aterramentos Típicos de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas*”, Dissertação de Mestrado, Orientador: Visacro S., LRC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, 1996.

SOARES Jr, A., “*Modelagem de Linhas de Transmissão para Avaliação de Desempenho frente a Descargas Atmosféricas*”, Tese de Doutorado, Orientador: Visacro S., LRC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, 2001.

SOARES Jr, A., VISACRO, S., SCHROEDER M. A. O, CHERCHIGLIA, L.C.L, CARVALHO, A.M., “*Investigação sobre o Aterramento de Torres da CEMIG para Melhoria de Desempenho Frente a Descargas Atmosféricas*”, SIPDA, São Paulo, 1997.

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.

SOUSA, W.M., COSTA, C.A., PEREIRA, I.H.; PEREIRA, C.S, “*Sistema de Localização Automática de Faltas em Linhas de Transmissão Utilizando Dados de Dois Terminais – Experiência Cemig*”, XVIII SNPTEE, Curitiba, Outubro 2005.

SULICIU, M. M., SULICIU, I., "A Rate Type Constitutive Equation for the Description of the Corona Effect", *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-100, pp. 3681-3685, August 1981.

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

UDO, T., “*Estimation of Lightning Shielding Failures and Mid-span Back-flashovers Based on the Performance of EHV Double Circuit Transmission Lines*”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, pp. 832-836, April 1997.

VAISALA, “*LP Series, LP 2000, LP 5000 User’s Guide*”, November, 2003.

VAISALA, “*LP Series, LP 2000, LP 5000 Reference Guide*”, November, 2003.

VISACRO, S., “*Aterramentos Elétricos: Conceitos básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento*”, pp. 1-159, ArtLiber Editora - São Paulo, 2002.

VISACRO, S., “*A representative curve for lightning current waveshape of first negative stroke*”, em *Geophysical Research Letters*, 31, no. 7, L07112, DOI:10.1029/2004.GL019642, 2003.

VISACRO, S., “*Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia*” livro, Artliber Editora Ltda, São Paulo, 2005.

VISACRO, S., "Direct Strokes to Transmission Lines: Considerations on the Mechanisms of Overvoltage Formation and their Influence on the Lightning Performance of Lines", Journal of Lightning Research, 2007.

VISACRO, S., "A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 22, p. 381-386, 2007b.

VISACRO, S., SCHROEDER, M. A. O., SOARES, A., CHERCHIGLIA, L. C. L. SOUSA, V. J., "Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station", J. of Geophysical Research, 109, 2004

VISACRO, S., DIAS, R.N., MESQUITA, C.R., "Aplicação não Convencional de SLT como Elemento Auxiliar de Decisão na Definição de Ações de Proteção de Linhas de Transmissão", Revista Eletroevolução, Nº. 34, pp. 24 a 28, Editora: CIGRÉ-Brasil, Rio de Janeiro, Março, 2004b.

VISACRO, S.; SOARES JUNIOR, A. . "HEM: A model for simulation of lightning related engineering problems". IEEE Transactions on Power Delivery, USA, v. 20, n. 2, p. 1206-1208, 2005.

VISACRO, S; SOARES JUNIOR, A. . "Sensitivity analysis for the effect of lightning current intensity on the behavior of earthing systems", in XXII-ICLP Proceedings (International Conference on Lightning Protection), Budapest, Hungary 1994.

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., "Surge impedance and its application to the Lightning Stroke", Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers Volume: 80 , Issue: 3, February, 1962.

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

WAHAB, Y. A., ABIDIN, Z. Z., SADOVIC, S., "Line surge arrester application on the quadruple circuit transmission line", Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, 2003.

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.