

JÚNIO CESAR CUNHA VIANA

**ESTUDO DE APLICAÇÃO DE PÁRA-RAIOS ZnO EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO EM REGIÕES DE NÍVEL CERÁUNICO E
RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO ELEVADOS**

Dissertação de mestrado apresentada à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica .

Orientador: Ivan José da Silva Lopes, Ph.D.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Minas Gerais

Setembro de 2009

Agradecimentos

- Agradeço ao meu maravilhoso Deus, por mais esta vitória e por ter escolhido as pessoas certas para auxiliar na elaboração deste trabalho;
- Ao Professor Dr. Ivan José da Silva Lopes, orientador desta tese, que foi extremamente atencioso e importante para a elaboração deste trabalho;
- A minha esposa e filhos, pelo amor, carinho e compreensão e aos meus pais pelo apoio, educação e exemplo de caráter e humildade;
- Ao Sr Ailton Lopes Souza, pelo fundamental auxílio, na utilização do programa PSCAD;
- Aos colegas da Dalben Consultoria, que são co-participantes deste trabalho;

- **RESUMO**

É notório saber que a aplicação de pára-raios ZnO em linhas de transmissão melhora o desempenho de uma dada LT, assunto este bastante discutido e comprovado em diversos trabalhos de reconhecimento internacional. Porém, existem poucas conclusões sobre o estudo a respeito da capacidade de absorção de energia pelos pára-raios, em linhas de transmissão com resistência de aterramento e nível cerâmico elevados, que são duas grandezas diretamente associadas à absorção de energia destes equipamentos. Tem sido observado que a aplicação de pára-raios em pontos específicos da LT, em muitos casos, tem se caracterizado como a melhor alternativa econômica se comparada à aplicação de pára-raios em todas as torres.

O presente trabalho avalia a capacidade de absorção de energia a ser exigida dos pára-raios nestas condições, compara capacidade exigida com a comumente atribuída a estes equipamentos pelos fabricantes, e avalia a necessidade de especificação de pára-raios com características especiais sob condições severas de dissipação de energia.

Para a análise da aplicação de pára-raios na LT, foi utilizado o programa de cálculo de transitórios eletromagnéticos PSCAD – versão educacional. Foram feitas simulações, a partir da modelagem da LT com a instalação de pára-raios em paralelo com as cadeias de isoladores, e foi avaliada a corrente e a energia a ser drenada pelos mesmos.

O fato dos pára-raios serem instalados em uma região muito desfavorável ao desempenho de uma LT acarreta uma maior solicitação com relação ao número de atuações e ao montante de energia a ser dissipada.

Foram avaliados dois casos distintos: instalação de pára-raios em todas as torres ao longo da LT e instalação de pára-raios apenas em torres específicas. Os resultados mostraram que, considerando descargas no topo da torre, os casos analisados apresentaram valores distintos, sendo que o caso de instalação de pára-raios em todas as torres apresentou os maiores níveis de energia a ser dissipada pelos mesmos.

ABSTRACT

It is well known that the application of ZnO arresters along transmission lines considerably improves their lightning performance. However, there is a lack of conclusive studies on the energy capability of these arresters when installed in highly exposed lines where, generally, the soil has high resistivity levels. In most cases, the application of ZnO arresters in only a few specific towers is a better economical alternative.

In the present work, the energy capability of ZnO arresters is systematically evaluated and compared with commercially available levels. The surge arresters and the transmission line are modeled together with the towers, their grounding system, shield-wires, and so on. The electromagnetic transient simulations are performed using PSCAD – Educational Version.

The proposed model is validated and followed by a comprehensive set of simulations. Finally, a hypothetical 230kV line case study is presented comparing the difference in the arresters energy levels for two cases: arresters installed in every tower and installed only in selected towers. The results show that for lightning strikes to towers (back-flashover outages), when arresters are installed in every tower, their energy capability has to be higher than when they are installed in selected towers.

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	MOTIVAÇÃO.....	1
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	2
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	INTRODUÇÃO.....	4
2.2	A DESCARGA ATMOSFÉRICA.....	4
2.2.1	Polaridade e intensidade das correntes das descargas atmosféricas.....	5
2.2.2	Multiplicidade das descargas atmosféricas.....	7
2.2.3	Tempo de frente das descargas atmosféricas	7
2.2.4	Tempo de meia onda e tempo de cauda de uma descarga atmosférica	7
2.3	PÁRA-RAIOS	8
2.3.1	Seleção e dimensionamento de pára-raios ZnO para linhas de transmissão.....	12
2.3.2	Modelo de pára-raios utilizado em programas de cálculo transitórios.....	13
2.4	PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	16
2.5	MODELAGEM DE LINHA DE TRANSMISSÃO PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	20
3	MODELAGEM DOS ELEMENTOS	23
3.1	A LINHA DE TRANSMISSÃO	23
3.2	A TORRE.....	24
3.3	A RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DAS TORRES	25
3.4	OS PÁRA-RAIOS	26
3.5	A DESCARGA ATMOSFÉRICA.....	27
3.6	VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO.....	27
3.6.1	Modelagem – Linha de 138 kV, circuito simples – Análise de sobretensões nas cadeias de isoladores	27
3.6.2	Modelagem – Linha de 115 kV, circuito simples – Análise da energia dissipada pelos pára-raios	34
3.6.2.1	Análise de energia dissipada nos pára-raios devido à descarga no topo da torre	35
4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NA MODELAGEM DA LT	40
4.1	DESCARGA NO CABO GUARDA OU TOPO DA TORRE – “BACKFLASHOVER”	41
4.1.1	Avaliação do efeito de torres adjacentes nas tensões verificadas sobre as cadeias de isoladores	41
4.1.2	Avaliação do efeito do comprimento dos vãos nas tensões sobre os isoladores..	44
4.1.3	Avaliação do efeito da resistência de aterramento nas tensões sobre os isoladores	45
4.1.4	Avaliação do ponto de incidência da descarga atmosférica na LT	46
4.2	AValiação DA APLICAÇÃO DE PÁRA-RAIOS.....	48
4.2.1	Avaliação das tensões verificadas sobre as cadeias de isoladores	48
4.2.1.1	Aplicação de pára-raios em duas fases;.....	49

4.2.2	Avaliação da energia dissipada pelos pára-raios.....	50
4.2.2.1	Efeito de torres adjacentes sem pára-raios	51
4.2.2.2	Efeito de torres adjacentes com pára-raios.....	53
4.2.2.3	Avaliação do efeito do comprimento dos vãos de uma LT	56
4.2.2.4	Avaliação do efeito da resistência de aterramento.....	57
4.2.2.5	Avaliação do ponto de incidência da descarga atmosférica na LT	57
4.2.2.6	Avaliação do efeito das descargas múltiplas e do valor de pico das descargas atmosféricas	58
5	ESTUDO DE CASOS	61
5.1	O PROGRAMA FLASH.....	61
5.2	DADOS NECESSÁRIOS PARA O CÁLCULO DO DESEMPENHO	62
5.3	CÁLCULO DO DESEMPENHO DA LT.....	63
5.3.1	Dados da LT:.....	64
5.3.2	Cálculo de desempenho da LT sob análise Com Uso do Programa Flash	67
5.3.2.1	Cálculo do desempenho da LT sem pára-raios.....	67
5.3.2.2	Cálculo do desempenho da LT com pára-raios	70
5.4	AVALIAÇÃO DA MAGNITUDE DAS ENERGIAS A SEREM DISSIPADAS NOS PÁRA-RAIOS	73
5.4.1	Avaliação da energia nos pára-raios.....	73
5.4.1.1	Caso 1 – Aplicação de pára-raios nas três fases de todas as torres.....	74
5.4.1.2	Caso 2 – Aplicação de pára-raios somente em torres específicas.....	76
5.4.1.3	Comparação dos resultados Caso 1 x Caso 2.	78
5.4.1.4	Análise de descargas subseqüentes.....	80
5.4.2	Avaliação econômica Caso 1 x Caso 2.....	81
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	82
6.1	CONCLUSÕES	82
6.2	TRABALHOS FUTUROS.....	84

LISTA DE FIGURAS

2.1	Frequência acumulada dos valores de pico das correntes de descargas atmosféricas [1].	7
2.2	Curvas VxI - Pára-raios a óxido de Zinco x Pára-raios Carboneto de Silício [2]	10
2.3	Curva VxI característica de um pára-raios ZnO de 420 kV [29].	12
2.4	Modelo de pára-raios ZnO, com parâmetros dependentes da frequência – IEEE [31]	15
2.5	Modelo de pára-raios ZnO, Pinceti [32]	16
2.6	Propagação de onda em uma linha monofásica com terminação resistiva - $R \rightarrow \infty$	19
2.7	Propagação de onda em uma linha monofásica com terminação resistiva - $R \rightarrow 0$	19
2.8	Propagação de onda em uma linha monofásica com terminação resistiva - $R = Z$	19
2.9	Propagação de onda em uma linha monofásica com pára-raios ZnO instalado no terminal.	20
3.1	Representação da LT disponível no PSCAD.	24
3.2	Cálculo da impedância de surto das torres	25
3.3	Representação da Modelagem de Torres de uma LT.	26
3.4	Curva tensão multiplicada pela corrente, PSCAD	27
3.5	Medidor de energia dissipada no pára-raios, disponível no PSCAD.	28
3.6	Torre típica da LT 138 kV [2].	30
3.7	Diagrama do programa – PSCAD.	31
3.8	Tensão no braço da torre, no condutor e na cadeia de isoladores [2].	32
3.9	PSCAD - Tensão no braço da torre, no condutor e na cadeia de isoladores.	32
3.10	Sobretensões nas cadeias de isoladores das fases A, B e C [2].	33
3.11	PSCAD – Sobretensões nas cadeias de isoladores das fases A, B e C.	34
3.12	Sobretensões nas cadeias de isoladores das três fases, pára-raios nas fases B e C [2].	34
3.13	PSCAD - Sobretensões nas cadeias de isoladores das três fases, pára-raios nas fases B e C	35
3.14	LT 115kV, Descarga de 100kA, no topo da torre [3].	37
3.15	LT 115kV, Descarga de 100kA, no topo da torre	37
3.16	LT 115kV, Descarga no meio do vão x topo da torre [3].	38
3.17	LT 115kV, Descarga no meio do vão x topo da torre.	39
3.18	LT 115kV, Energia x Resistência de aterramento[3].	39
3.19	LT 115kV, Energia x Resistência de aterramento.	40
4.1	Diagrama de uma torre no programa PSCAD	42
4.2	Diagrama de três torres no programa PSCAD.	43
4.3	Tensões sobre as cadeias de isoladores – Influência das torres adjacentes.	44
4.4	Efeito da resistência de aterramento e torre adjacente.	44
4.5	Tensões sobre as cadeias de isoladores – Influência do comprimento do vão.	45
4.6	Tensões sobre as cadeias de isoladores- Influência da resistência de aterramento	47
4.7	Tensões sobre as cadeias de isoladores– Influência do ponto de incidência da descarga	48
4.8	Corrente que flui pela torre	49

4.9	Tensões sobre as cadeias de isoladores – Pára-raios nas fases A e B	50
4.10	Desenho ilustrativo das torres simuladas	52
4.11	Energia dissipada x N° de torres adjacentes - Sem pára-raios nas torres adjacentes.	53
4.12	Desenho ilustrativo da Simulação de uma torre adjacente e duas torres adjacentes.	53
4.13	Energia dissipada x N° de torres adjacentes - Com pára-raios nas torres adjacentes.	55
4.14	Correntes de descarga nos pára-raios.	56
4.15	Forma de onda da descarga atmosférica com 3 descargas subsequêntes.	60
5.1	Torre típica da LT 230 kV sob análise.	66
5.2	Resistência de aterramento das torres – Trecho 1.	69
5.3	Resistência de aterramento das torres – Trecho 2	69
5.4	Resistência de aterramento das torres – Trecho 3.	70
5.5	Máxima energia dissipada pelos pára-raios - Caso 1 x Caso 2 – Trecho 1	80
5.6	Máxima energia dissipada pelos pára-raios - Caso 1 x Caso 2 – Trecho 2	80
5.7	Máxima energia dissipada pelos pára-raios - Caso 1 x Caso 2 – Trecho 3	80

LISTA DE TABELAS

4.1	Tensões sobre as cadeias de isoladores - Para diversos arranjos.	51
4.2	Energia dissipada x N° de torres adjacentes - Sem pára-raios nas torres adjacentes.	53
4.3	Energia dissipada x N° de torres adjacentes - Com pára-raios nas torres adjacentes.	55
4.4	Energia dissipada nos pára-raios em função do comprimento dos vãos.	57
4.5	Energia dissipada nos pára-raios em função da resistência de aterramento.	58
4.6	Energia dissipada em função do ponto de incidência da descarga atmosférica.	59
4.7	Energia dissipada em função da multiplicidade e valor de pico das correntes de descarga. .	61
5.1	Resistência de aterramento das torres.	67
5.2	Resistência de aterramento - Trecho – 1 (Torre 1 à torre 57)	68
5.3	Resistência de aterramento - Trecho – 2 (Torre 58 à Torre 114)	68
5.4	Resistência de aterramento - Trecho – 3 (Torre 115 à Torre 171).	69
5.5	Desligamentos por Backflashover – Trechos 1, 2 e 3.	70
5.6	Resistência de aterramento - Adequação Trecho – 1 (Torre 1 à Torre 57).	71
5.7	Resistência de aterramento - Adequação Trecho – 2 (Torre 58 à Torre 111).	72
5.8	Resistência de aterramento - Adequação Trecho – 3 (Torre 115 à Torre 171).	72
5.9	Desligamentos por Backflashover – Adequação Trechos 1, 2 e 3	72
5.10	Torres indicadas para instalação de pára-raios ZnO	73
5.11	Máxima energia dissipada no pára-raios de cada torre – Caso 1.	76
5.12	Máxima energia dissipada no pára-raios de cada torre – Caso 2	78

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

No Brasil, o nível ceráunico - índice que mede o número de dias de trovoadas por ano - está entre os mais elevados do mundo, representando um elevado estresse sobre as linhas de transmissão. De acordo com as estatísticas internacionais, as descargas atmosféricas são responsáveis por 65% dos desligamentos em linhas de transmissão. O estado de Minas Gerais, por sua vez, tem apresentado um percentual acima da média internacional [16]. Este é um problema de grande importância a ser enfrentado, uma vez que a cada dia exige-se do sistema elétrico uma confiabilidade cada vez maior.

A aplicação de pára-raios ZnO em linhas de transmissão vem se tornando um procedimento comum no sentido de melhorar o desempenho das mesmas. De acordo com diversas pesquisas [4, 5, 7 - 9], os resultados têm se mostrado satisfatórios e, na maioria dos casos, configura-se como a melhor alternativa sob aspectos técnicos e econômicos para a melhoria do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Entretanto, vale ressaltar que os locais onde a instalação dos pára-raios se reveste de elevada importância são exatamente os locais onde eles serão mais exigidos, uma vez que estarão submetidos às sobretensões com maior frequência e de maior intensidade. Conseqüentemente, os níveis de energia serão elevados e o comportamento dos mesmos deve ser avaliado tendo em vista que a normalização de pára-raios prescreve ensaios padronizados com aplicação de sobretensões provocadas por descargas com tempo de frente, tempo de cauda e valores de pico pré-definidos [28].

Com base no exposto, este trabalho investiga os níveis de energia aos quais os pára-raios de uma linha de transmissão estarão sujeitos, admitindo-se que a resistência de

aterramento das torres será elevada bem como o nível cerâmico. Avalia-se, a partir de simulações, os efeitos que os componentes de uma linha de transmissão (comprimento do vão, torre, resistência de aterramento, cabos guarda), a intensidade e o ponto de incidência das descargas atmosféricas têm sobre os níveis de energia. De posse destes dados, verificou-se a capacidade de absorção de energia dos pára-raios, comparada aos valores nominais comumente encontrados no mercado. Discute-se então se os níveis exigidos estão de acordo com os nominais ou se é necessária a especificação de pára-raios especiais.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos principais deste trabalho são:

- Avaliar os montantes de energia aos quais os pára-raios de uma linha de transmissão com resistências de aterramento e nível cerâmico elevados estarão submetidos, e se estes níveis estão de acordo com a capacidade de absorção de energia nominal dos pára-raios analisados.
- Avaliar globalmente a relação custo-benefício proveniente da aplicação de pára-raios em linhas de transmissão.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Esta dissertação está organizada da maneira que se segue:

No Capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica das informações relevantes para a análise do desempenho de uma linha de transmissão e para a modelagem de pára-raios na mesma. As informações contidas nesse capítulo servirão de base para todo o trabalho.

No Capítulo 3, apresentam-se os passos que foram utilizados para a elaboração da modelagem dos elementos e fenômenos envolvidos quando uma linha de transmissão é

atingida por uma descarga atmosférica. Como validação do modelo proposto, é apresentada também, uma comparação entre os resultados obtidos com o modelo proposto neste trabalho e os resultados de trabalhos de outros autores [2 e 3].

No Capítulo 4, verifica-se a influência da variação cada componente da LT (comprimento do vão, torre, resistência de aterramento) sobre as tensões resultantes na mesma e nos níveis de energia a serem absorvido pelos pára-raios quando da incidência de descargas atmosféricas.

No Capítulo 5, é apresentada inicialmente uma breve descrição do programa FLASH, que foi utilizado para um cálculo inicial do desempenho de uma LT de 230 kV hipotética frente às descargas atmosféricas. Os resultados apresentados pelo programa mostraram uma LT com um desempenho inadequado. Uma vez que tal programa não permite a simulação de pára-raios, foi adotado um artifício a fim de simular, por meio do Flash, o efeito deles na LT. Em seguida, é apresentado o estudo de dois casos para a LT de 230 kV: o primeiro caso é o da instalação de pára-raios em todas as cadeias de isoladores, e o segundo é o da instalação de pára-raios somente nas cadeias de isoladores das torres indicadas pela análise feita utilizando-se o programa FLASH, que são as torres que apresentam as resistências de aterramento mais elevadas. Os níveis de energia são comparados e uma discussão dos resultados é apresentada.

No Capítulo 6, apresentam-se as conclusões gerais do estudo e proposições de trabalhos futuros em complementação ao presente trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo aborda os parâmetros e a modelagem dos componentes de linhas de transmissão, com o intuito de estudar os fenômenos que envolvem seu desempenho frente às descargas atmosféricas.

2.2 A DESCARGA ATMOSFÉRICA

As descargas atmosféricas são eventos naturais que ocorrem a partir do surgimento de campos elétricos internos e externos às nuvens provenientes da separação de cargas de polaridades positiva e negativa da interação entre o solo e a nuvem. Estes campos elétricos gerados rompem a rigidez dielétrica do ar e resultam em descargas atmosféricas [1 e 2].

A formação da descarga atmosférica apresenta duas fases importantes: num primeiro momento, tem-se a formação de um caminho ionizado entre a nuvem e o solo, tecnicamente chamado de descarga piloto; em seguida ocorre a ionização do ar no ponto em que a rigidez dielétrica do mesmo é superada estabelecendo-se a chamada corrente de retorno. A descarga pode ser de nuvem para nuvem, de nuvem para solo ou de solo para nuvem, mas somente as descargas de nuvem para o solo têm influência no sistema elétrico de potência, provocando as sobretensões que muitas vezes causam desligamentos [2].

Para a presente análise, a corrente de retorno da descarga será modelada como uma fonte de corrente ideal, com forma de onda em rampa, no seu ponto de incidência, em conformidade com outros trabalhos já desenvolvidos [35].

2.2.1 Polaridade e intensidade das correntes das descargas atmosféricas

Aproximadamente 90% das descargas que atingem as linhas de transmissão possuem polaridade negativa. Porém, vale ressaltar que as descargas de polaridade positiva possuem maior valor de pico [2].

As descargas atmosféricas são eventos que vem sendo monitorados e pesquisados por anos e anos. Especificamente no Brasil, o INPE (ELAT) juntamente com outras instituições são responsáveis pelo monitoramento das descargas atmosféricas. A partir do monitoramento, foi possível constatar a característica aleatória do fenômeno e desenvolver expressões para a aproximação das características das descargas atmosféricas [1, 2 e 27].

Apresenta-se na Figura 2.1 a curva da distribuição da frequência acumulada das amplitudes das correntes de descargas atmosféricas de polaridade negativa, baseada em dados coletados em diversas localidades. A Figura apresenta duas curvas distintas sendo uma mais recente e atualmente utilizada em muitos trabalhos proposta por Anderson, e outra mais antiga proposta por Popolansky. Para a curva proposta por Anderson, nota-se a que o valor médio das correntes de descarga é de 31 kA e que os valores máximos esperados são da ordem de 200kA. Para a curva proposta por Popolansky o valor médio é de 25 kA. Ambas as curvas receberam uma aproximação através de uma curva Log-normal.

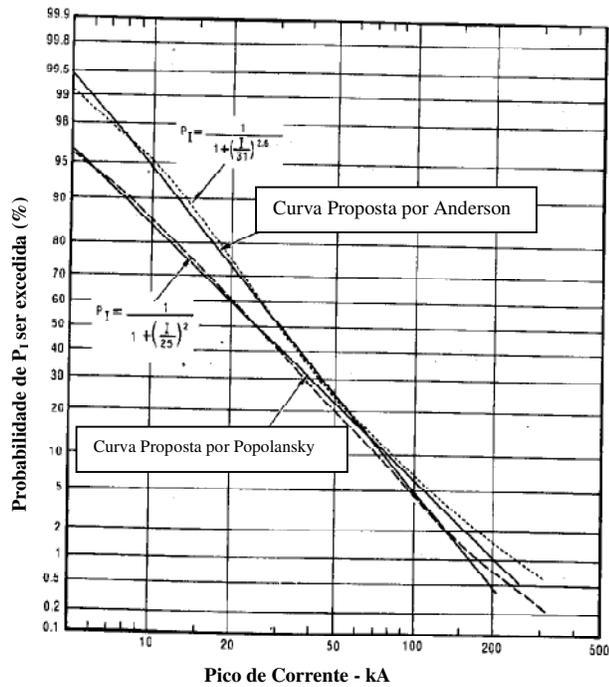


Figura 2.1: Frequência acumulada dos valores de pico das correntes de descargas atmosféricas [1].

A partir da curva de frequência acumulada (Figura 2.1), é possível obter a expressão que calcula a probabilidade do valor de pico de uma corrente de descarga atmosférica ultrapassar um certo valor [2]:

$$P_I = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2,6}} \quad (2.1)$$

Onde:

I = Valor da corrente (kA);

P_I = probabilidade do valor de pico da corrente de descarga I ser excedida.

Conforme mostra a Expressão 2.1, o valor médio das correntes de descarga atmosférica é de 31kA, onde a probabilidade da corrente I exceder este valor é igual a 50%; isto é, 50% das descargas que incidem sobre a terra possuem amplitudes superiores a 31 kA; por outro lado a probabilidade de uma descarga atmosférica exceder 200 kA é de 0,77%.

2.2.2 Multiplicidade das descargas atmosféricas

Uma descarga atmosférica pode conter descargas múltiplas. Este fato é extremamente importante para a avaliação da energia a ser absorvida pelos pára-raios de uma linha de transmissão. As descargas simples correspondem a 45 a 55% do total das descargas. As descargas múltiplas raramente apresentam mais de 10 componentes, (em média apresentam 3) e quase nunca possuem intensidade superior à da primeira descarga, possuindo em média intensidade da ordem de 40% da primeira componente [2 e 35].

2.2.3 Tempo de frente das descargas atmosféricas

A determinação do tempo de frente de onda típico tem como base medições efetuadas durante anos e anos de monitoramento. A partir daí foi possível a obtenção da distribuição estatística da taxa de crescimento de uma corrente de descarga e sua dependência com o valor de pico da corrente. Desta forma, a probabilidade do tempo de frente de descargas atmosféricas com polaridade negativa ser excedida pode ser determinada a partir da seguinte expressão [1]:

$$P_{dl} = \frac{1}{1 + \left(\frac{dI/dt}{24}\right)^4} \quad (2.2)$$

P_{dl} = probabilidade do tempo de frente da descarga elétrica ser excedida.

dI/dt = Taxa de variação da corrente (kA/ μ s)

2.2.4 Tempo de meia onda e tempo de cauda de uma descarga atmosférica

O tempo de meia onda, também chamado de tempo de semi-cauda, é definido como o intervalo de tempo entre o início da corrente de descarga e o tempo no qual a descarga atinge o valor equivalente à metade do valor de pico da corrente de descarga [2].

O tempo de cauda é o intervalo de tempo entre o momento que a descarga atmosférica atinge o valor de pico da corrente e o momento em que a corrente extingue [1 e 2].

A definição do tempo de cauda é extremamente importante para a verificação das solicitações impostas aos pára-raios, visto que uma descarga com tempo de cauda muito elevado irá impor uma maior solicitação aos pára-raios se comparada a uma descarga com tempo de cauda reduzido. O tempo de cauda médio da primeira descarga é igual a $77,5\mu\text{s}$ e das subseqüentes é de $30,2\mu\text{s}$ [2].

2.3 PÁRA-RAIOS

Os pára-raios ZnO surgiram no início da década de 1970, sendo que Matsouka foi o pioneiro da aplicação do óxido de zinco em pára-raios de alta tensão [39]. O óxido de zinco apresenta características elétricas extremamente não-lineares e capacidade de absorção de energia superior ao carboneto de silício (material até então utilizado na fabricação de pára-raios). Entre as melhorias apresentadas pela utilização de óxido de zinco em pára-raios, podem ser citadas: baixa tensão residual, alta não-linearidade, alta capacidade de absorção de energia, eliminação dos centelhadores série necessários nos pára-raios a carboneto de silício e tempo de resposta reduzido frente a fenômenos transitórios [6 e 28]. A possibilidade de eliminação dos centelhadores série pode ser percebida pela análise da Figura 2.2, onde é possível perceber que até atingir-se a tensão de operação do pára-raios ZnO, para grandes variações de tensão tem-se uma pequena corrente drenada, diferentemente dos pára-raios a carboneto de silício.

Os pára-raios a carboneto de silício necessitam de centelhadores uma vez que, para pequenas variações de tensão, verifica-se grandes variações na corrente drenada por eles (Figura 2.2). Desta forma, o equipamento não poderia ser conectado diretamente à fase. A adoção de centelhadores ou “gaps” permitiu a utilização de pára-raios a carboneto de silício no sistema elétrico de potência. Porém, a tensão de atuação dos pára-raios ficou condicionada a outros fatores tais como distância entre os centelhadores, poluição e condições climáticas.

Para os pára-raios ZnO, pode-se observar na Figura 2.2 que a elevada não linearidade característica do óxido de zinco, permite que o equipamento tenha pequenas variações de corrente a ser drenada, frente a grandes variações de tensão, até a chamada tensão nominal do pára-raios, quando este entra em condução mantendo a tensão constante, independentemente do aumento da a corrente a ser drenada pelo equipamento, permitindo assim a conexão direta do mesmo ao sistema elétrico de potência, sem a presença de centelhadores. Em condições normais de operação, os pára-raios ZnO drenam uma corrente da ordem de mA que normalmente não provoca nenhum dano ao equipamento, mas que deve ser monitorada pois o seu crescimento pode denotar um defeito que conseqüentemente poderá implicar em uma falha do equipamento [2].

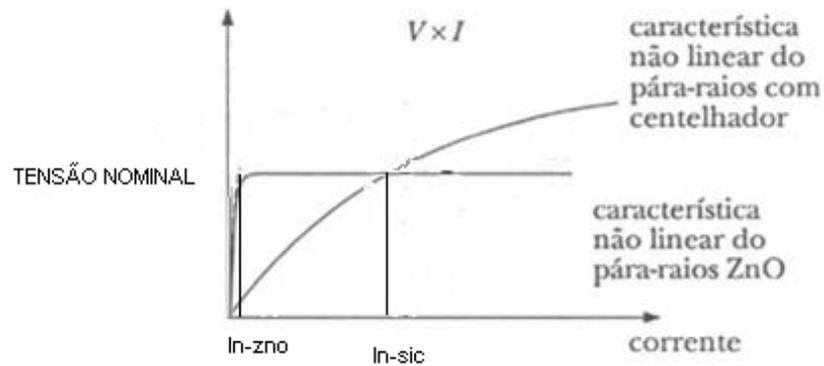


Figura 2.2: Curvas $V \times I$ - Pára-raios a óxido de Zinco x Pára-raios Carboneto de Silício [2].

Um fator extremamente importante para a caracterização do comportamento de um pára-raios é a definição da curva $V \times I$ deste equipamento. Para um melhor entendimento desta curva dividimos a mesma em três partes, conforme apresentado na Figura 2.3.

A Parte 1 é caracterizada pela tensão na qual o pára-raios poderá operar continuamente sem comprometer sua integridade. Nas especificações técnicas de pára-raios, esta tensão é comumente denominada como MCOV (maximum continuous operating voltage). Este valor de tensão é fornecido pelo fabricante, sendo da ordem de 80% a 90% da tensão nominal do pára-raios [2]. A condução de corrente na primeira parte da curva está relacionada com a característica não linear dos semicondutores, onde a temperatura exerce forte influência. Quanto maior a temperatura, maior será a energia armazenada nos elétrons facilitando a passagem na barreira de potencial imposta pelos semicondutores. Essa dependência com a temperatura explica o aumento da corrente de fuga quando verifica-se um aumento na temperatura de operação dos pára-raios.

A Parte 2 é a região de alta não linearidade, onde o pára-raios conduzirá correntes de elevadas amplitudes. Nesta região, pequenas variações de tensão implicam em grandes variações na corrente drenada pelos pára-raios.

Esta região é caracterizada pela chamada tensão de operação transitória comumente denominada TOV (transitory over voltage). É admissível que o pára-raios opere nesta região por até 10s. Tal região é responsável pela suportabilidade dos pára-raios frente aos transitórios em 60Hz, que possam surgir no sistema elétrico. Caso o pára-raios seja submetido a uma operação nesta região por um tempo superior a 10s, a corrente de fuga associada elevará a temperatura das pastilhas ZnO que, por sua vez, elevará a corrente de fuga do pára-raios [29].

Nestas condições, a energia absorvida pelos elétrons das pastilhas de óxido de zinco se torna tão alta que as colisões causadas pelo movimento dos elétrons provocam brechas

reduzindo a barreira de potencial e permitindo o aumento da corrente. A continuidade deste processo pode levar à destruição das pastilhas de óxido de zinco, passando para a Parte 3 da Figura 2.3.

A Parte 3 é a região onde os pára-raios drenam correntes muito elevadas, acima de sua capacidade nominal. Esta região possui relação direta com o nível de proteção oferecido pelo pára-raios contra impulsos atmosféricos. A Figura 2.3 ilustra a curva de uma pára-raios com capacidade nominal de 10kA. Caso o pára-raios seja submetido a uma corrente superior à corrente nominal de descarga, este poderá entrar em processo de avalanche térmica onde a barreira de potencial das pastilhas de óxido de zinco seria destruída [29].

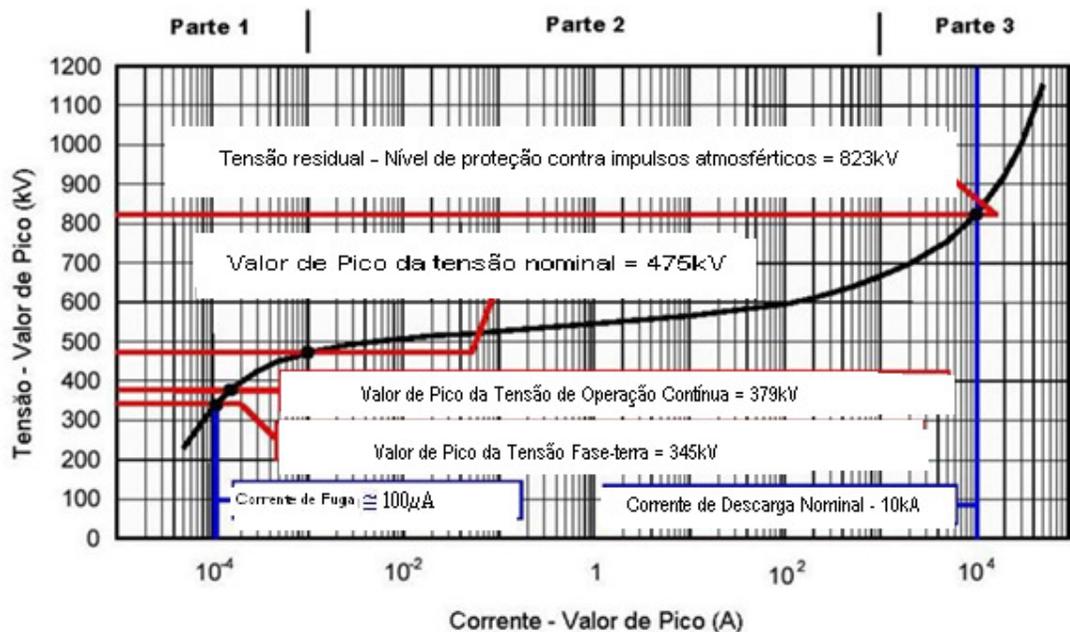


Figura 2.3: Curva VxI característica de um pára-raios ZnO de 420 kV, [29].

Um dado muito importante para o presente trabalho é a conceituação do que vem a ser capacidade de absorção de energia de um pára-raios [33]. A capacidade de absorção de energia de um pára-raios é a capacidade do pára-raios drenar uma dada energia sem que haja

comprometimento de sua integridade física. A capacidade de absorção de energia de um pára-raios é baseada na característica construtiva de suas pastilhas de óxido de zinco. Pára-raios ZnO normalmente possuem capacidade de absorção de energia na faixa de 2 a 7 kJ/kV [2]. Por exemplo, um pára-raios de uma LT 230 kV possui uma tensão nominal de 192 kV e capacidade de absorção de energia igual a 5,1kJ/kV. A energia total que este pára-raios é capaz de drenar durante a ocorrência de um surto é de $192 \times 5,1 = 979\text{kJ}$.

A energia absorvida por um pára-raios pode ser obtida a partir da Expressão 2.3 [2], que é a integral da potência.

$$E_n = \int_{t_i}^{t_f} v(t)i(t)dt \quad (2.3)$$

Onde:

$v(t)$ – Tensão que se estabelece sobre o pára-raios;

$i(t)$ – Corrente drenada pelo pára-raios;

$(t_i - t_f)$ – Intervalo de tempo da dissipação de uma dada corrente.

2.3.1 Seleção e dimensionamento de pára-raios ZnO para linhas de transmissão

Os pára-raios de linhas de transmissão geralmente são aplicados em linhas com baixo desempenho frente às descargas atmosféricas. Na maioria das vezes, este desempenho está relacionado a elevados valores de resistência de aterramento das torres da LT ou ao alto nível cerâmico da região [10, 13, 17, 19, 20 e 21].

A aplicação de pára-raios em todas as cadeias de isoladores praticamente elimina os desligamentos por descargas atmosféricas. Porém, soluções que visam uma melhor relação custo-benefício em detrimento de uma frequência de desligamentos aceitável, podem ser, em muitos casos, uma boa alternativa. Ainda dentro deste contexto, a correta especificação dos pára-raios com relação à capacidade de absorção de energia, pode representar uma economia

significativa no projeto de aplicação de pára-raios de linha, uma vez que quanto maior a capacidade de absorção de energia atribuída a um pára-raios, maior será o seu custo [4, 10, 15, 17 e 26].

A energia a ser absorvida pelo pára-raios está diretamente relacionada com o ponto de incidência da descarga, com a amplitude das correntes de descarga, com a frequência de descargas incidentes e, como mencionado anteriormente, com a resistência de aterramento da torre.

A especificação do pára-raios ZnO, a partir de procedimentos estatísticos, deve ser elaborada conforme o roteiro apresentado a seguir [15, 21 e 33]:

- Determinação da vida útil aceitável para o pára-raios;
- Cálculo do número de descargas por ano no cabo guarda e condutores fase, baseado na geometria da linha e densidade de descargas na região;
- Cálculo da probabilidade de falha dos pára-raios em função da vida útil aceitável e do número de descargas nos condutores fase e no cabo guarda calculados;
- Cálculo da energia a ser dissipada pelos pára-raios, para descargas no cabo guarda e condutor fase a partir de uma distribuição estatística da incidência.

2.3.2 Modelo de pára-raios utilizado em programas de cálculo transitórios

A forma mais simples de se modelar um pára-raios em cálculos de transitórios eletromagnéticos é através da utilização de um resistor não linear, de forma a obter a curva $V \times I$ característica do pára-raios. O IEEE desenvolveu um modelo que apresenta respostas confiáveis, o qual é recomendado em análise de descargas atmosféricas cujos parâmetros são calculados em função da frequência [24, 25 e 31].

Apresenta-se na Figura 2.4 o modelo proposto pelo IEEE. Neste modelo, a característica não linear $V \times I$ é representada por duas resistências não lineares A_0 e A_1 , as quais são

separadas por um filtro R-L cuja impedância é baixíssima. Para o correto funcionamento do modelo, é essencial que as duas seções representadas por A0 e A1 estejam em paralelo. O filtro R-L só tem influência nos resultados para surtos com frente de onda rápida.

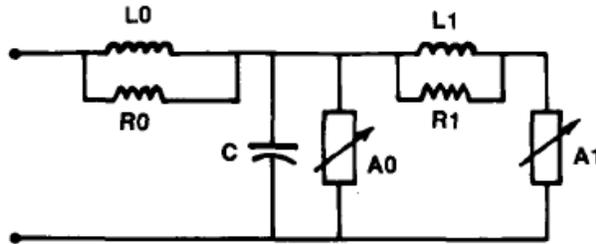


Figura 2.4: Modelo de pára-raios ZnO, com parâmetros dependentes da frequência - IEEE, [31].

L1 e R1 podem ser obtidos a partir das seguintes equações:

$$L1 = 15d/n \mu\text{H} \quad (2.4)$$

$$R1 = 65d/n \Omega \quad (2.5)$$

d = comprimento dos pára-raios em metros

n = número de pára-raios em paralelo.

A0 e A1 = obtidos através do uso das curvas VxI características dos pára-raios ZnO, sendo que possuam características de tensão distintas.

O capacitor C representa a capacitância externa dos pára-raios, devido à altura do equipamento em relação ao solo. A indutância L0 representa a indutância associada ao campo magnético junto ao pára-raios. O resistor R0 é utilizado para estabilizar a integração numérica permitindo a modelagem em programa computacional que não possuem esta capacidade tais como ATP.

L0, R0 e C podem ser obtidos a partir das seguintes equações:

$$L0 = 0.2d/n \mu\text{H} \quad (2.6)$$

$$R0 = 100d/n \Omega \quad (2.7)$$

$$C = 100n/d \text{ pF} \quad (2.8)$$

Uma simplificação do modelo IEEE foi proposta por Pinceti [36] e consiste na eliminação do capacitor C devido ao seu pequeno efeito nos resultados, e na substituição das duas resistências em paralelo com as indutâncias por uma resistência entre os terminais de entrada. A diferença entre o modelo proposto pelo IEEE e o proposto por Pinceti é 9,6% para a energia dissipada pelos pára-raios[32]. Apresenta-se na Figura 2.5 o modelo proposto por Pinceti:

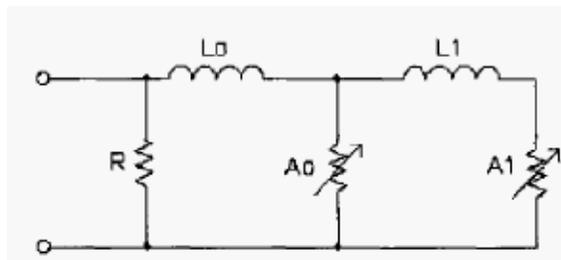


Figura 2.5: Modelo de pára-raios ZnO, Pinceti [32]

Os parâmetros do modelo de Pinceti são obtidos da seguinte forma: As resistências não lineares, assim como no modelo do IEEE, são baseadas nas curvas V x I, referidas ao pico de tensão residual medida durante uma descarga de teste para uma corrente de 10 kA com rampa de $2 \times 20\mu\text{s}$ [36].

As indutâncias podem ser obtidas a partir das seguintes equações:

$$L1 = \frac{1}{4} * \frac{V_{r1/T2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} * V_n \quad (2.9)$$

$$L0 = \frac{1}{12} * \frac{V_{r1/T2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} * V_n \quad (2.10)$$

Onde:

V_n – Tensão nominal do pára-raios;

$V_{r1/T2}$ – Tensão residual para onda de descarga de 10 kA, frente onda rápida;

$V_{r8/20}$ – Tensão residual para onda de descarga de 10kA, com rampa de $8/20 \mu\text{s}$.

O modelo de pára-raios existente na biblioteca do PSCAD, programa a ser utilizado no presente trabalho, é o modelo proposto por Pincetti. Em função da praticidade de se ter um modelo pronto para a modelagem dos pára-raios no programa PSCAD e a constatação da pequena diferença entre os modelos propostos pelo IEEE e por Pincetti, o modelo disponível no PSCAD foi utilizado nas análises do presente trabalho.

2.4 PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi necessária uma revisão sobre os conceitos de propagação de ondas em linhas de transmissão, uma vez que a propagação das ondas tem efeito direto nas sobretensões nas cadeias de isoladores e na energia a ser dissipada pelos pára-raios.

As figuras 2.6 a 2.8 apresentam uma dada LT cuja impedância está representada pela letra Z, enquanto que a terminação resistiva está representada pela letra R. Além disso, são apresentadas nas mesmas figuras as ondas de tensão e corrente que compõem os efeitos de propagação de ondas em linhas de transmissão.

As ondas incidentes são dependentes da fonte geradora de sinal. As ondas refletidas são obtidas a partir da multiplicação das ondas incidentes pelos coeficientes de reflexão os quais podem ser calculados pelas Expressões 2.11 para tensão e 2.13 para corrente.

As ondas refratadas são resultantes da soma das ondas incidente e refletida, e podem ser calculadas a partir das expressões 2.12 para tensão e 2.14 para corrente[37].

Ondas de tensão:

$$\text{Coeficiente de reflexão} = \frac{R-Z}{R+Z} \quad (2.11)$$

$$\text{Coeficiente de refração} = \frac{2R}{R+Z} \quad (2.12)$$

Ondas de corrente:

$$\text{Coeficiente de reflexão} = -\frac{R-Z}{R+Z} \quad (2.13)$$

$$\text{Coeficiente de refração} = \frac{2Z}{R+Z} \quad (2.14)$$

De acordo com as expressões, para uma onda de tensão, trafegando em uma LT com terminação resistiva assumindo o valor de zero, o coeficiente de reflexão será igual a -1 e o coeficiente de refração zero. Em outras palavras, a onda refletida terá sentido e polaridade opostos à onda incidente, onde a soma das duas será zero. Para o caso onde a terminação resistiva tende para um valor infinito, o coeficiente de reflexão é igual a 1 e o coeficiente de refração é 2. A onda refletida terá sentido oposto e mesma polaridade da onda incidente. O resultado da soma das duas ondas será exatamente o dobro da onda incidente.

Para as ondas de corrente, os resultados são os seguintes: para a terminação resistiva assumindo o valor de zero o coeficiente de reflexão será igual a 1 e o coeficiente de refração será 2, dobrando portanto o valor da corrente. Para o caso que a terminação resistiva tende para um valor infinito o coeficiente de reflexão é igual a -1 e o coeficiente de refração é 0, e a onda refratada será nula.

As Figuras 2.6 a 2.8 ilustram 3 diferentes situações para a propagação de ondas de tensão e corrente em uma linha monofásica [37].

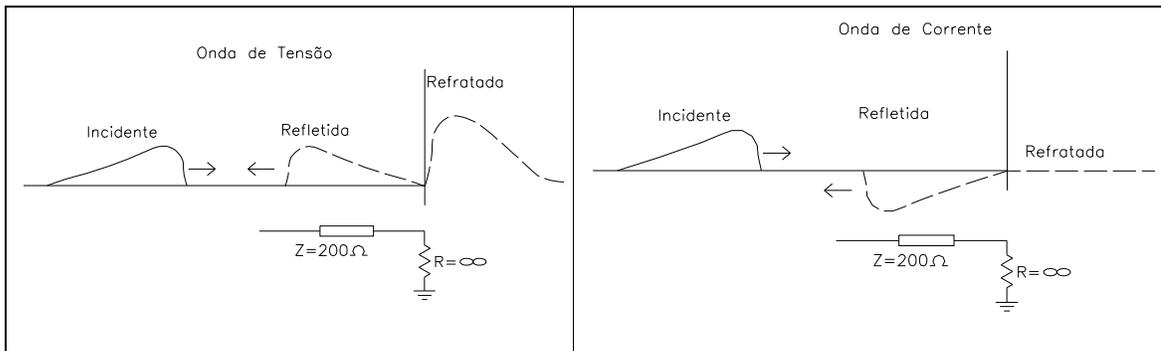


Figura 2.6: Propagação de onda em uma linha monofásica com terminação resistiva - $R \rightarrow \infty$

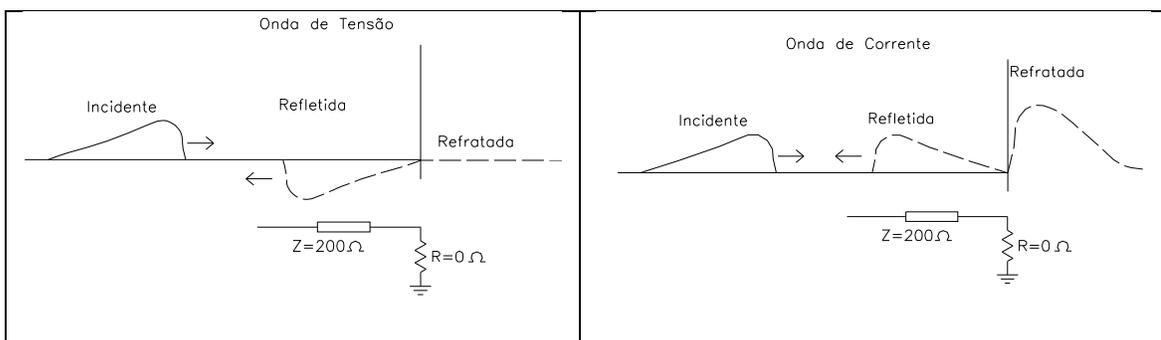


Figura 2.7: Propagação de onda em uma linha monofásica com terminação resistiva - $R \rightarrow 0$

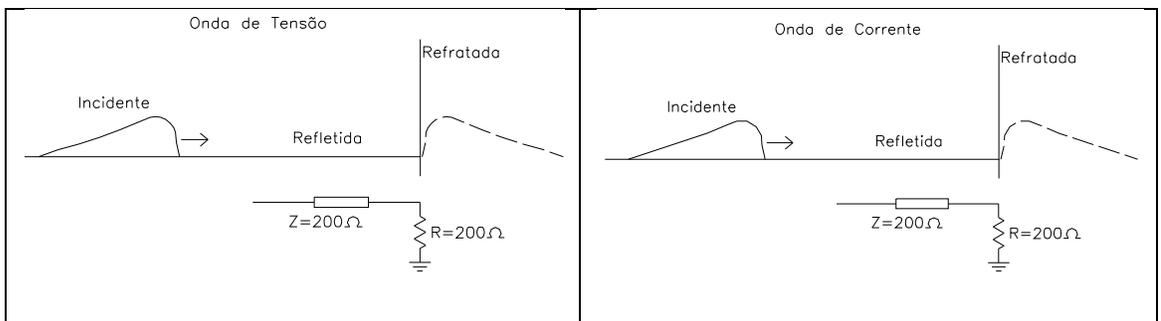


Figura 2.8: Propagação de onda em uma linha monofásica com terminação resistiva - $R = Z$

Os pára-raios ZnO são elementos não lineares cujo comportamento pode ser aproximado ao de uma resistência tendendo para o infinito num primeiro momento antes de entrar em operação. Quando uma tensão crescente nos terminais do pára-raios atinge a tensão nominal do mesmo, o pára-raios tem o comportamento de uma resistência com valor tendendo a zero ou mesmo um curto-circuito.

A Figura 2.9, apresenta o comportamento das ondas em uma linha de transmissão terminada por um pára-raios. No instante igual a $t=0^-$, a onda de tensão refratada assume um

valor elevado e, após a tensão nominal do pára-raios ser atingida, este entra em operação e a tensão refratada assume o valor da tensão de proteção imposta pelo pára-raios. Para a onda de corrente, o resultado é oposto ao da tensão: no instante igual a $t=0^-$, a onda de corrente refratada assume o valor zero até o pára-raios entrar em operação. Nesse ponto, a onda refratada assume um valor elevado, pois a onda refletida passa a ter a mesma polaridade da onda incidente.

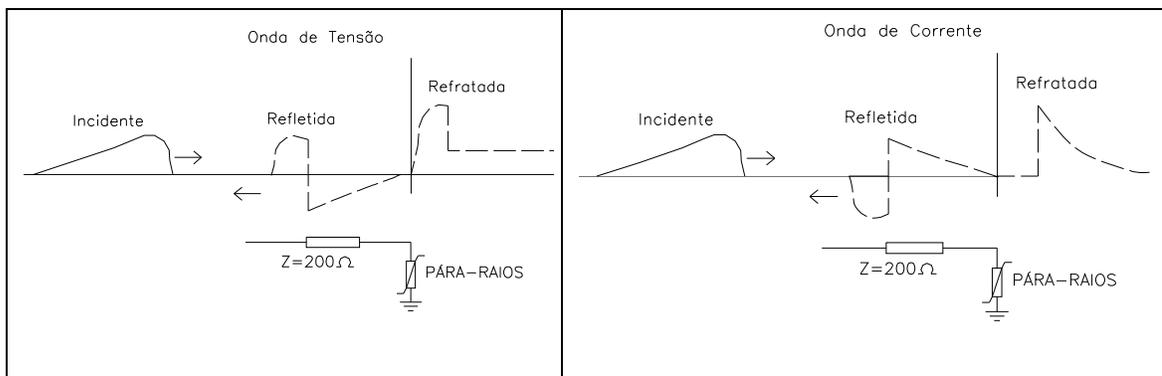


Figura 2.9: Propagação de onda em uma linha monofásica com pára-raios ZnO instalado no terminal

2.5 MODELAGEM DE LINHA DE TRANSMISSÃO PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

É extremamente importante a correta seleção de um modelo a ser adotado para um trabalho de análise dos efeitos das descargas atmosféricas sobre uma linha de transmissão. Atualmente, existem muitos trabalhos de modelagem que apresentam suas vantagens e desvantagens quer seja para os condutores e cabo guarda, quer seja da torre nos aspectos de modelagem [11, 18, 22 e 23].

Em conformidade com outros trabalhos desenvolvidos [18, 22 e 23], bons resultados podem ser obtidos a partir da representação da linha de transmissão através de várias seções polifásicas não transpostas cujos valores são dependentes da frequência, sendo que para representação dos vãos são utilizados vários segmentos de linha em série. É fundamental a representação da linha de transmissão nos dois sentidos a partir do ponto de incidência da descarga atmosférica na LT.

As torres são os elementos que exercem a maior influência nos resultados obtidos, razão pela qual existem vários modelos propostos para a representação das torres.

O modelo comumente utilizado é a representação da torre através de uma linha de transmissão monofásica, com parâmetros LC constantes. Existem outros modelos mais complexos, porém as diferenças verificadas são pequenas e o modelo aqui descrito apresenta bons resultados para torres com altura de até 30 metros [18].

Para a representação da torre, é importante verificar as tensões estabelecidas em cada mísula da respectiva fase, razão pela qual são utilizadas varias linhas verticais em série, representando os trechos de torre entre o cabo guarda e a mísula da fase A, entre a mísula da fase A e a mísula da fase B, entre a mísula da fase B e a mísula da fase C e entre a mísula da fase C e o pé da torre, isso vale para uma torre cujos condutores estão dispostos em alturas

diferentes [18]. Para utilização deste modelo, são necessárias as definições da impedância de surto e tempo de trânsito na torre [18].

A modelagem da resistência de aterramento das torres recomendada nas referências [1, 18], inclui a modelagem de uma resistência não linear com parâmetros variáveis com a corrente que flui pela mesma. Esta consideração tem como finalidade levar em conta o efeito de ionização do solo que ocorre no momento que a corrente da descarga atmosférica se dissipa no solo. Nesse momento a resistividade do solo reduz em função da maior densidade de corrente, aumentando assim a área para dissipação da descarga atmosférica. Quanto maior o valor de pico da corrente, menores valores de resistência de aterramento são verificados na torre [1, 18].

Conforme apresentado em outros trabalhos [18, 22], a modelagem da resistência de aterramento das torres é melhor representada por uma resistência não linear variável com a corrente, tendo em vista que quando uma descarga atmosférica se dissipa no solo, a densidade de corrente próximo a torre provoca a ionização do solo, fazendo com que a resistividade deste, e conseqüentemente a resistência de aterramento no pé da torre, reduza momentaneamente, com isso, para uma descarga atmosférica de valor de pico elevado, o valor da resistência de aterramento da torre tende a diminuir à medida que este valor de pico se eleva.

A não linearidade da resistência de aterramento das torres pode ser calculada a partir das seguintes expressões:

$$R_T = \frac{R_0}{\sqrt{1+I/I_g}} \quad (2.15)$$

$$I_g = \frac{E_0 \rho}{2\pi R_0^2} \quad (2.16)$$

Onde:

R_0 – Resistência de aterramento da torre;

R_T – Resistência de aterramento da torre considerando o efeito de ionização do solo;

I – Corrente da descarga atmosférica que passa pela resistência de aterramento;

I_g – Valor da corrente de início de ionização do solo;

E_0 – Gradiente de ionização do solo (400kV/m)

ρ – Resistividade do solo;

A seguir, apresentam-se os passos para a construção e validação do modelo proposto no presente trabalho.

3 MODELAGEM DOS ELEMENTOS

Este capítulo é destinado a descrever a modelagem adotada para cada elemento considerado nas simulações para as análises dos efeitos das descargas atmosféricas sobre as linhas de transmissão.

3.1 A LINHA DE TRANSMISSÃO

A modelagem de linhas de transmissão recomendada pelo CIGRE e utilizada por alguns trabalhos consultados [22, 23] propõe a representação da LT através de várias seções polifásicas não transpostas com parâmetros distribuídos sendo os valores dependentes da frequência. No modelo, devem ser representados os vãos da LT nos dois lados do ponto de incidência da descarga atmosférica. O programa PSCAD possui um modelo de LT que apresenta as características mencionadas na referência [23].

Apresenta-se na Figura 3.1 a Figura representativa do modelo de LT disponível no PSCAD, e utilizado nas simulações.

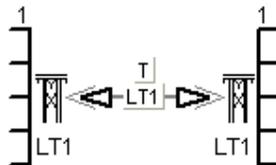


Figura 3.1: Representação da LT disponível no PSCAD

A entrada dos dados da LT a ser modelada no programa PSCAD não apresenta dificuldades, além de apresentar diversas opções de modelos de LT a serem escolhidos conforme o enfoque da análise.

3.2 A TORRE

Para a representação das torres, foi utilizado o modelo de linha monofásica [18, 34]. O modelo disponível no PSCAD é o modelo proposto por Bergeron cujos parâmetros LC são distribuídos, em conformidade com o utilizado em outros trabalhos [18 e 22]. Para a modelagem, foi necessária a determinação da impedância de surto da torre [1] e o tempo de trânsito τ , que é obtido através da divisão do comprimento da seção sob análise pela velocidade de propagação [1].

Para cada silhueta de torre, existe uma formulação diferente para obtenção da impedância de surto, conforme mostra a Figura 3.2.

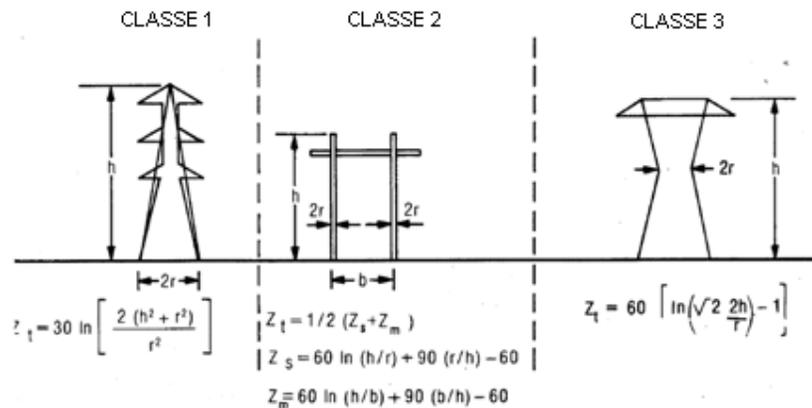


Figura 3.2: Cálculo da impedância de surto das torres [1].

Para a avaliação do efeito de reflexão em torres adjacentes nas fases A, B e C, a LT foi modelada com diversos trechos em série representando os espaçamentos existentes entre as mísulas fases A, B, C e o pé da torre.

Apresenta-se na Figura 3.3 o modelo do PSCAD, utilizado para as torres nas simulações. Nesta figura, a mísula da fase A está representada pelo ponto entre a Seção 1 – Torre 1 e a Seção 2 – Torre 1, a mísula da fase B está representada pelo ponto entre a Seção 2 – Torre 1 e a Seção 3 – Torre 1.

3.4 OS PÁRA-RAIOS

Foi utilizado o modelo do pára-raios presente no PSCAD, onde o único dado de entrada a ser fornecido ao programa foi a tensão nominal dos pára-raios. Foi utilizada a curva $V \times I$ padrão disponibilizada pelo PSCAD, cujos dados são apresentados na Figura 3.4.

A Figura 3.5 mostra a modelagem dos pára-raios no PSCAD, instalados em paralelo com as cadeias de isoladores. As cadeias de isoladores não foram modeladas face sua pequena contribuição nos resultados, conforme discutido por outros trabalhos [2, 3, 18, 22, 23].

Conforme já mencionado, o pára-raios existente na biblioteca do PSCAD utiliza o modelo de Pinceti, que é derivado do modelo recomendado pelo IEEE [32].

Para a obtenção da energia dissipada pelos pára-raios foi utilizado um medidor de energia disponibilizado pelo PSCAD, que multiplica a tensão pela corrente num determinado intervalo de tempo, conforme discutido no item 2.3.

A título de ilustração, apresenta-se na Figura 3.4, a curva resultante da multiplicação da tensão estabelecida sobre um pára-raios pela corrente através do mesmo, efetuando-se uma aproximação pelo cálculo da área de um triângulo, obtém-se o valor da área sob a curva de 190.000, valor que pode ser observado para a energia medida, apresentada na Figura 3.5.

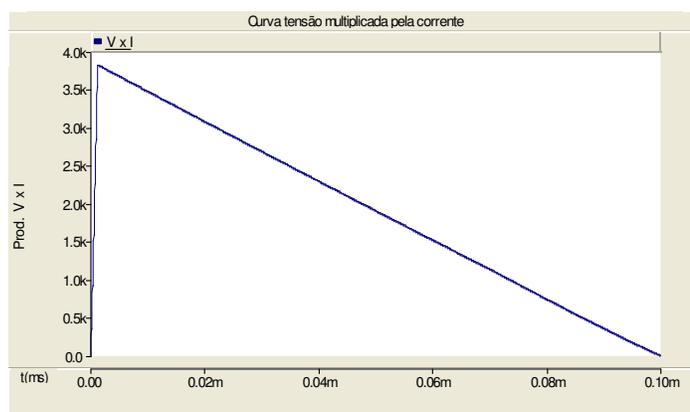


Figura 3.4: Curva tensão multiplicada pela corrente, PSCAD.

Apresenta-se na Figura 3.5 o medidor de energia disponibilizado pelo PSCAD, onde foi simulada uma descarga atmosférica sobre um pára-raios de 192 kV.

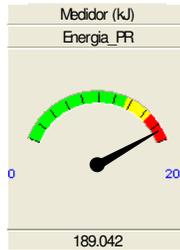


Figura 3.5: Medidor de energia dissipada no pára-raios, disponível no PSCAD.

3.5 A DESCARGA ATMOSFÉRICA

A descarga atmosférica foi modelada como uma fonte de corrente com forma de onda triangular, com tempos de frente e cauda, pré-definidos. Não foi considerada a tensão de regime da LT.

3.6 VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

Para a validação da modelagem da LT proposta no presente trabalho, foram utilizados dois casos exemplos presentes nas referências [2 e 3]. A comparação dos resultados obtidos na modelagem do presente trabalho com os resultados dos exemplos permitiu a validação do modelo proposto no presente trabalho.

3.6.1 Modelagem – Linha de 138 kV, circuito simples – Análise de sobretensões nas cadeias de isoladores

Neste item, é apresentada a modelagem de uma LT de 138 kV, sem a presença de pára-raios, com especial enfoque nas sobretensões verificadas sobre as cadeias de isoladores, devidas a uma dada descarga atmosférica incidente no topo da torre.

Dados da LT sob análise:

- Condutor: LINNET;
- Cabo guarda: 3/8" EHS;
- Flecha dos condutores: 8,0 m;
- Flecha do cabo guarda: 5,5m;
- Vão médio: 350m;
- Impedância de surto da torre: 205,22 Ω (ver a seguir)

Conforme apresentado na Figura 3.2 – Classe 1, a impedância de surto pode ser calculada pela seguinte expressão [1]:

$$Z_t = 30 \ln \left[2 \left(\frac{h^2 + r^2}{r^2} \right) \right] \quad (3.3)$$

Onde:

Altura da torre: $h = 27$ m;

Raio do meio da torre: $r = 1,25$ m;

$\Rightarrow Z_t = 205,22 \Omega$.

Apresenta-se na Figura 3.6 a silhueta da torre (típica da LT de 138kV) sob análise, com indicação das distâncias pertinentes:

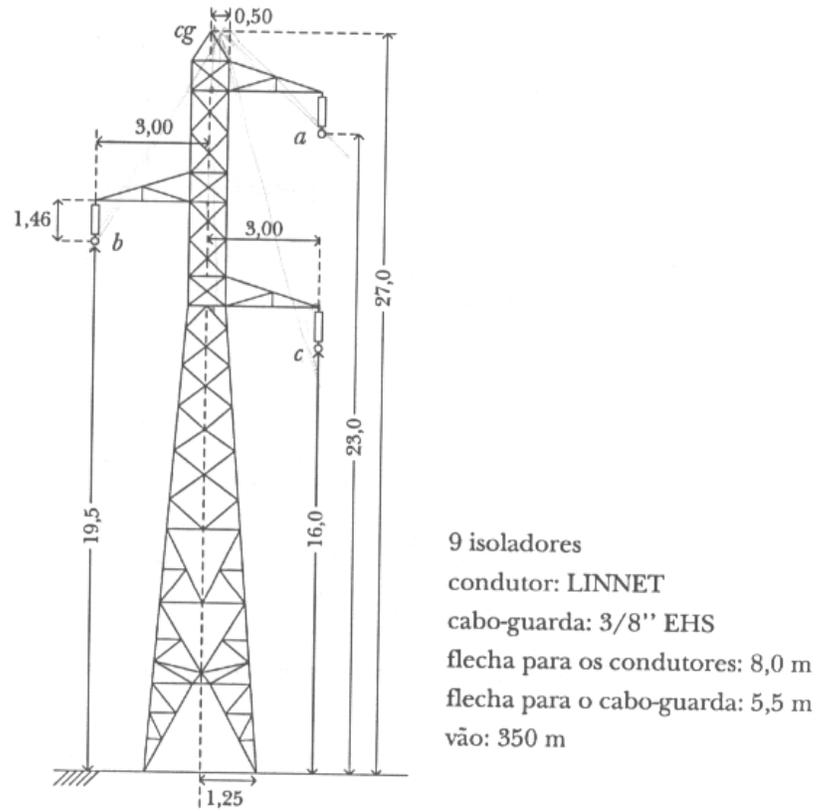


Figura 3.6 : Torre típica da LT 138 kV [2].

A Figura 3.7, apresenta a descrição do modelo simulado no programa PSCAD. Para a torre, foi considerada uma resistência de aterramento de 70Ω , em conformidade com a referência [2]. Foram modeladas 5 torres adjacentes e, nas extremidades, foram admitidas linhas de transmissão com o comprimento suficiente para evitar os efeitos de reflexões de onda nos tempos de simulação considerados.

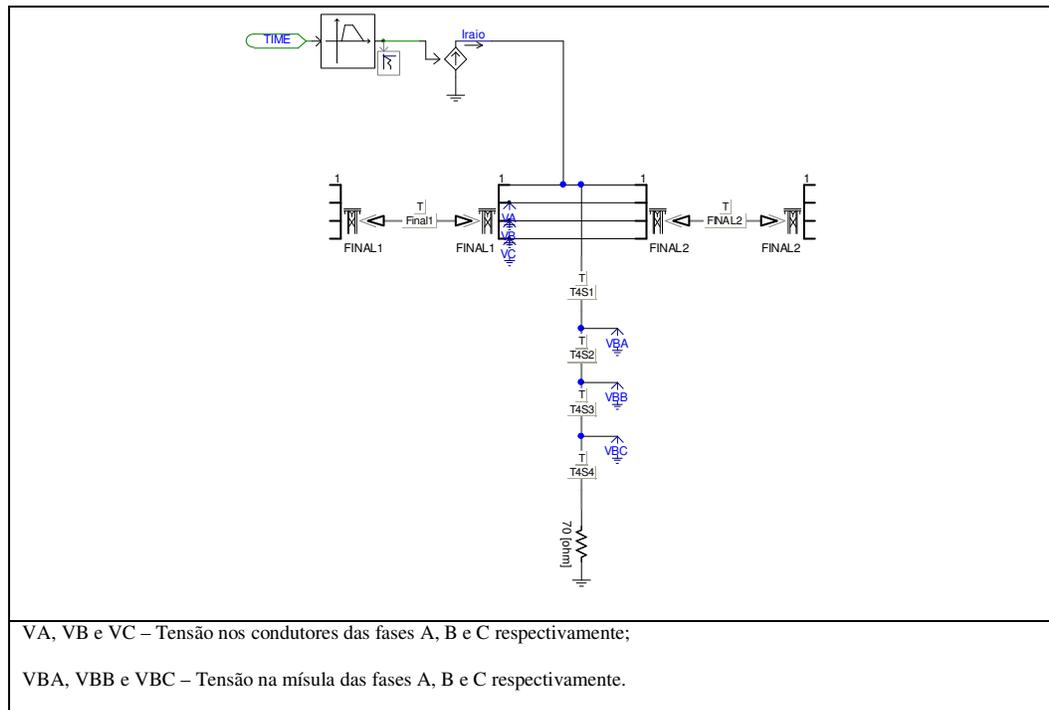


Figura 3.7: Diagrama do programa – PSCAD.

A descarga atmosférica incidente no topo da torre foi modelada como uma fonte de corrente com onda triangular, 20 kA, $1,0 \times 50 \mu\text{s}$.

As Figuras 3.8[2] e 3.9 apresentam as formas de onda das tensões na mística da fase C (braço), no condutor da fase C e sobre a cadeia de isoladores da fase C. Comparando-se os resultados, observa-se que o valor máximo da tensão verificada no braço é da ordem de 1.300 kV nas duas simulações. Os valores máximos de tensão verificados no condutor e na cadeia de isoladores também apresentam valores semelhantes. Da mesma forma, os valores de tensão verificados em $15\mu\text{s}$ são muito próximos nas duas simulações. A pequena diferença verificada nos resultados pode estar associada à quantidade, não informada, de torres adjacentes simuladas na referência [2].

É possível notar nestas figuras a forma como se compõe a tensão sobre as cadeias de isoladores, sendo esta tensão o resultado da diferença entre a tensão no condutor e a tensão no braço da referida fase causada por uma descarga atmosférica incidente. A tensão que se

estabelece sobre as cadeias de isoladores é o fator principal que define o desempenho da LT frente às descargas atmosféricas.

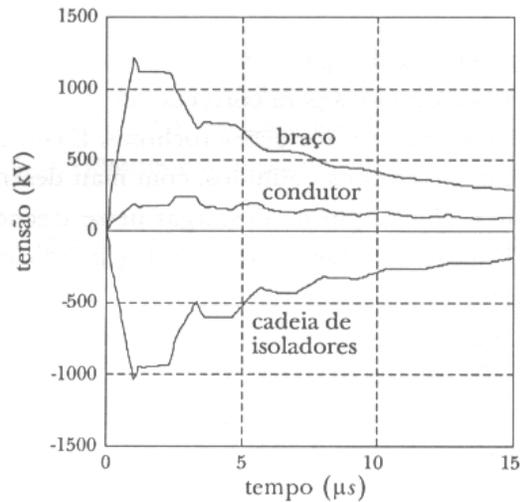


Figura 3.8: Tensão no braço da torre, no condutor e na cadeia de isoladores [2].

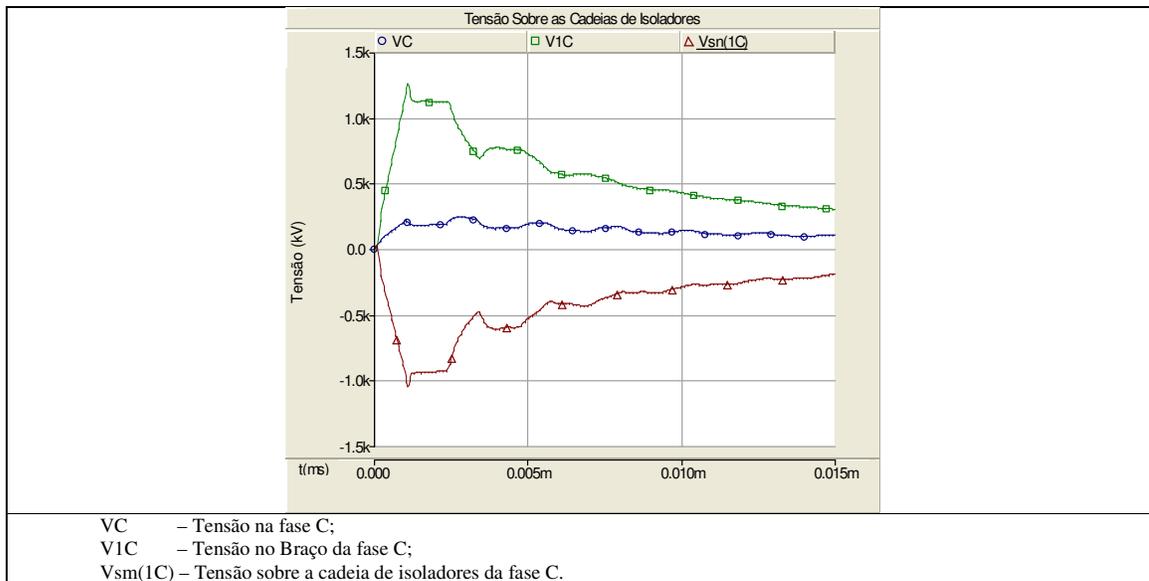


Figura 3.9: PSCAD - Tensão no braço da torre, no condutor e na cadeia de isoladores.

As Figuras 3.10 e 3.11 apresentam as tensões estabelecidas sobre a cadeia de isoladores das fases A, B e C. Comparando-se os resultados, observa-se que os valores de pico da tensão são semelhantes, com valores da ordem de 1.050 kV para as duas simulações. A tensão

verificada na fase C é superior à da fase B que é, por sua vez, superior à da fase A. Nota-se que os valores de tensão a $15\mu s$ são praticamente idênticos nas duas simulações.

A indicação da tensão resultante sobre as cadeias de isoladores das fases A, B e C, se presta a verificar a influência do efeito do acoplamento que se estabelece entre o cabo guarda e os condutores-fase, quando da ocorrência de uma descarga atmosférica. A tensão sobre a cadeia de isoladores é o resultado da diferença entre a tensão que se estabelece no braço da torre de uma dada fase em relação à terra e a tensão que se estabelece no respectivo condutor fase em relação à terra [1].

Quando uma descarga atmosférica incide sobre o cabo guarda, a corrente que trafega neste condutor induz uma tensão nos condutores fase. Essa tensão induzida será maior quanto menor for a distância entre cabo guarda e condutor. Com isso, em torres com alturas das fases diferentes umas das outras, a fase mais próxima do cabo guarda terá uma tensão induzida maior e conseqüentemente, a diferença de potencial entre cabo guarda e condutor será menor, provocando uma menor sobretensão na cadeia de isoladores.

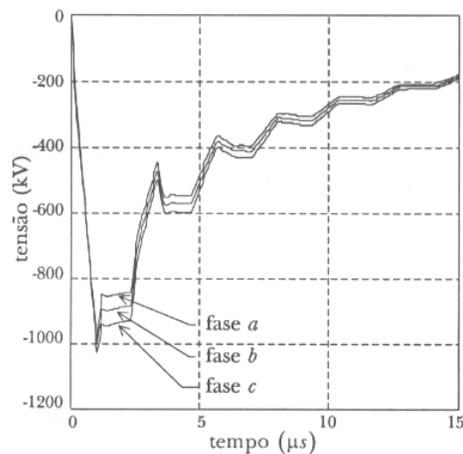


Figura 3.10: Sobretensões nas cadeias de isoladores das fases A, B e C [2].

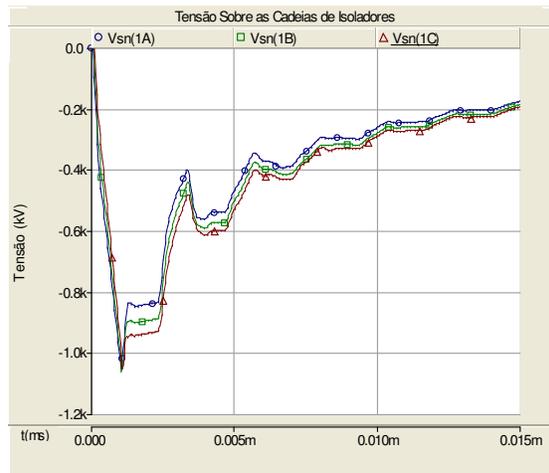


Figura 3.11: PSCAD – Sobretensões nas cadeias de isoladores das fases A, B e C.

As Figuras 3.12 e 3.13 apresentam as tensões estabelecidas sobre a cadeia de isoladores das fases A, B e C, considerando a aplicação de pára-raios nas fases B e C. Observa-se que o valor de pico da tensão estabelecida na cadeia de isoladores da fase A é da ordem de 700 kV para a Figura 3.12 e 750 kV para a Figura 3.13, A tensão de atuação dos pára-raios é da ordem de 390 kV para as duas figuras. Observa-se que no tempo de 15 μ s, as tensões verificadas são praticamente as mesmas em torno de 200 kV.

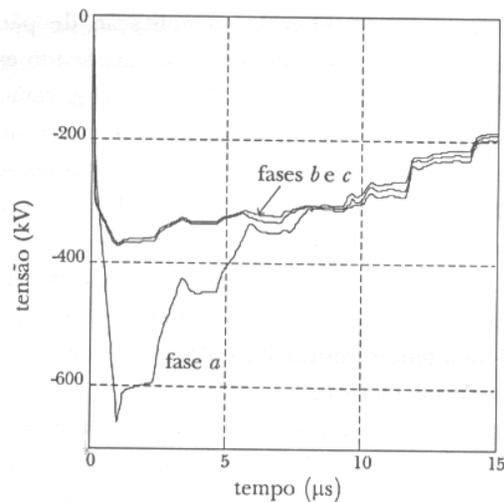


Figura 3.12: Sobretensões nas cadeias de isoladores das três fases, pára-raios nas fases B e C [2].

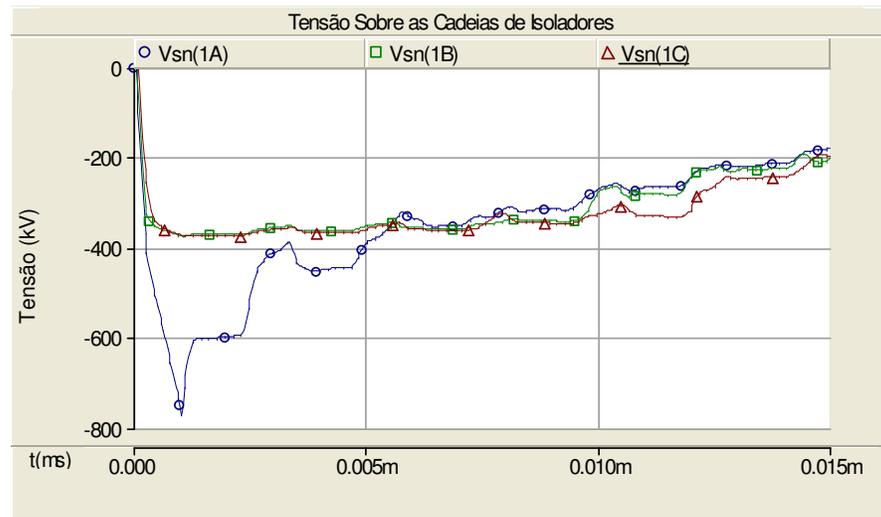


Figura 3.13: PSCAD - Sobretensões nas cadeias de isoladores das três fases, pára-raios nas fases B e C.

A comparação efetuada atesta uma pequena diferença entre os resultados e valida a modelagem da LT proposta no presente trabalho, para análise de sobretensões devidas às descargas atmosféricas. Tal diferença pode se dever às diferenças entre a modelagem dos elementos (LT, torre, resistência de aterramento e forma de onda da descarga atmosférica) proposta no presente trabalho e a modelagem dos elementos proposta na referência [2]. No item 3.6.2 a seguir, apresenta-se uma outra análise comparativa, com maior enfoque na energia a ser dissipada pelos pára-raios, que constitui o principal objetivo do presente trabalho.

3.6.2 Modelagem – Linha de 115 kV, circuito simples – Análise da energia dissipada pelos pára-raios

Neste item, é apresentada a modelagem de um caso exemplo apresentado em [3], para validação do modelo proposto no presente trabalho, no que se refere à energia dissipada pelos pára-raios.

Dados da LT 115kV pertinentes à modelagem no programa PSCAD:

- LT 115 kV, circuito simples, dois condutores por fase;

- Condutores fase 336,4 MCM (Linnet)
- Altura da torre: 17,4 m;
- Disposição dos condutores Fase A(x=-4,0m; y=14,3m), Fase B (x=0m; 14,3m), Fase C (x=4,0; y=14,3m);
- Raio médio geométrico = 0,0074 m;
- Resistência_{DC} = 0,1735 Ω /km;
- Flecha dos condutores: 10,8m;
- 2 Cabos guarda (EHS 5/16”);
- Disposição dos pára-raios (x=-1,9m; y=17,4m) e (x=1,9m; 17,4);
- Raio_{cabo guarda} = 0,0040 m;
- Resistência_{DC} = 4,3061 Ω /km;
- Flecha dos cabos guarda: 9,33m.
- Vão médio: 230m;
- Resistência de aterramento da torres = 55 Ω ;
- Conforme Figura 3.2 classe 3, a impedância de surto da torre é de 135,3 Ω para h = 17,4 m e r = 1,9 m.

Os valores de energia dissipada pelos pára-raios foram obtidos através de medidores de energia disponibilizados pelo PSCAD, conforme descrito no item 3.4.

3.6.2.1 Análise de energia dissipada nos pára-raios devido à descarga no topo da torre

As Figuras 3.14 e 3.15 apresentam os valores de energia a serem dissipadas pelos pára-raios, devido a uma descarga atmosférica de 100kA (2,37 x 50 μ s) no topo da torre, variando-se o número de torres adjacentes modeladas. Conforme pode ser observado, os resultados obtidos no presente trabalho, (Figura 3.15), são muito próximos aos resultados apresentados na referência 3 (Figura 3.14).

Comparando-se os resultados, as diferenças apuradas são da ordem de 10%, nota-se também a redução da energia a ser dissipada pelos pára-raios, à medida que o número de torres adjacentes com pára-raios se reduz. Isto se deve às reflexões das ondas de corrente nos pára-raios das torres adjacentes. As ondas de corrente refletidas voltam para o pára-raios da torre atingida pela descarga aumentando a corrente a ser dissipada. Este fato está de acordo com discussão apresentada no item 2.4 da revisão bibliográfica.

Além disso, pode-se verificar que a energia a ser dissipada para o caso com três pára-raios por estrutura é menor se comparada com o caso de instalação nas fases A e C. Com isso, pode-se concluir que a instalação de 3 pára-raios por torre, implica numa distribuição de energia que impõe menores montantes de energia a ser dissipada pelos pára-raios se comparado com alternativas de se instalar 1 ou 2 pára-raios por torre [3].

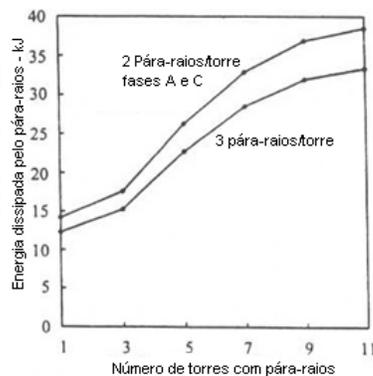


Figura 3.14: LT 115kV, Descarga de 100kA, no topo da torre [3].

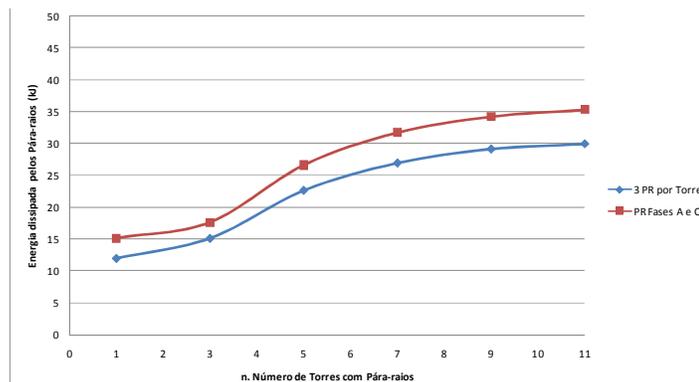


Figura 3.15: LT 115kV, Descarga de 100kA, no topo da torre.

As Figuras 3.16 e 3.17 apresentam os valores de energia a serem dissipadas pelos pára-raios, para duas condições: descarga atmosférica no topo da torre e descarga atmosférica no meio do vão da LT, com variação dos valores de pico das correntes de descarga atmosférica.

Pode-se observar que os montantes de energia devidos à descarga no topo da torre são bem superiores aos verificados para uma mesma descarga que incide no meio do vão.

Esta diferença se intensifica, à medida que se eleva o valor de pico da corrente de descarga atmosférica. A elevação da energia dissipada pelos pára-raios está diretamente associada à elevação dos valores de pico das correntes de descargas atmosféricas. Pode-se observar que, os resultados obtidos no presente trabalho, (Figura 3.17), são muito próximos aos resultados apresentados na referência 3 Figura 3.16. Conforme pode ser constatado, os resultados são muito próximos, apresentando diferenças da ordem de 10%.

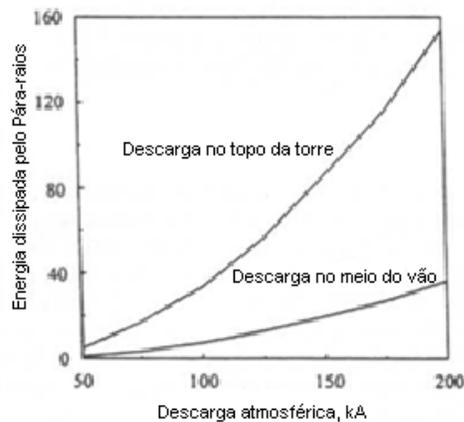


Figura 3.16: LT 115kV, Descarga no meio do vão x topo da torre [3].

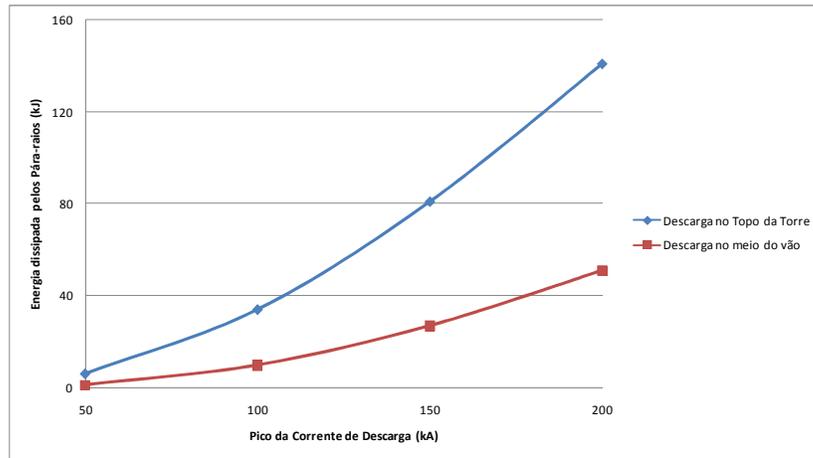


Figura 3.17: LT 115kV, Descarga no meio do vão x topo da torre.

As Figuras 3.18 e 3.19 apresentam os valores de energia a serem dissipadas pelos pára-raios, devidos a variação da resistência de aterramento das torres. Para a obtenção dos resultados foi utilizada uma corrente de descarga atmosférica no topo da torre de 100kA $2,37 \times 50\mu s$.

De acordo com os resultados, pode-se verificar a relação direta entre a elevação dos montantes de energia a serem dissipadas com a elevação da resistência de aterramento das torres.

Pode-se observar através da comparação dos resultados, que as diferenças verificadas entre os valores presentes na Figura 3.18 [3] comparados com os valores presentes na Figura 3.19, são reduzidas sendo da ordem de 10%.

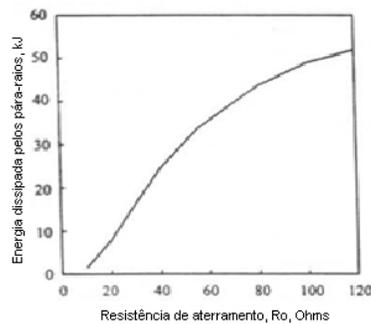


Figura 3.18: LT 115kV, Energia x Resistência de aterramento [3].

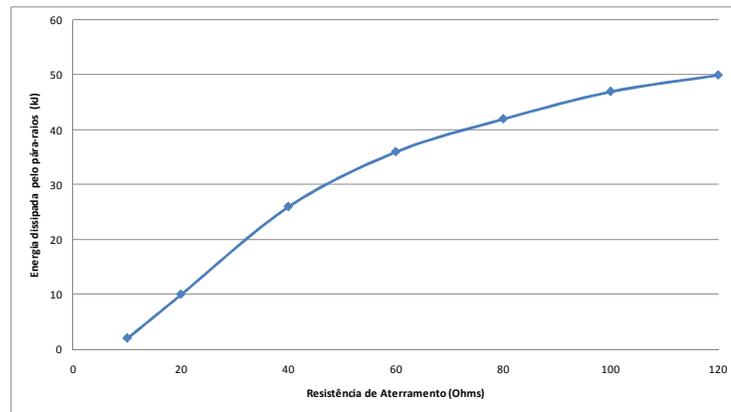


Figura 3.19: LT 115kV, Energia x Resistência de aterramento.

Uma vez que o foco principal do presente trabalho é o levantamento dos montantes de energia dissipada pelos pára-raios, a obtenção de resultados confiáveis é de extrema importância.

As diferenças verificadas entre o modelo proposto no presente trabalho e os resultados tomados como referência para validação do modelo [3], foram na média da ordem de 10%, diferença aceitável face às simplificações existentes no modelo proposto.

Este capítulo apresentou a validação do modelo proposto a partir de comparações dos resultados das simulações com outros trabalhos tomados como referência [2, 3].

A seguir apresenta-se uma análise de sensibilidade sobre a influência que diferentes valores atribuídos aos elementos na modelagem da LT (número de torres adjacentes, comprimento do vão, resistência de aterramento, ponto de incidência) têm sobre as tensões resultantes e na energia dos pára-raios.

4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NA MODELAGEM DA LT

Apresenta-se neste capítulo, uma análise quantitativa da influência de cada componente da linha de transmissão nas sobretensões nas cadeias de isoladores e na energia dissipada nos pára-raios.

Para a análise de sensibilidade, foram avaliados os resultados obtidos para a simulação de descargas atmosféricas sobre uma LT de 138kV, do item 3.6.1, variando-se diversos parâmetros conforme o foco das análises.

Apresenta-se a seguir os principais dados utilizados na modelagem da LT no PSCAD:

- LT 138 kV, circuito simples, disposição triangular dos condutores, um cabo guarda;
- Condutores fase (Linnet), cabo guarda (EHS 3/8");
- Flecha para os condutores fase 8,0m e flecha para o cabo guarda 5,5m;
- Resistência de aterramento da torre 40 ohm;
- Disposição dos cabos guarda e condutores – Ver Figura 3.6;
- Vão médio 350m;
- Descarga atmosférica, 31 kA 1,2 x 50 μ s (Valor médio de Descarga atmosférica [1]);
- Dimensões – Ver Figura 3.6

Para evitar problemas de reflexão nos terminais da LT, as extremidades da mesma foram consideradas com um comprimento de 20 km, suficiente para evitar reflexões. Foi admitido que a propagação das ondas na LT, possuem velocidades próximas à da luz. As ondas refletidas levariam um tempo de 133,2 μ s para percorrer os 20km de ida e volta. Uma vez que o tempo das simulações não excede 100 μ s, o comprimento de 20 km atende às necessidades.

4.1 DESCARGA NO CABO GUARDA OU TOPO DA TORRE – “BACKFLASHOVER”

Neste item, foram avaliados os efeitos que alguns parâmetros exercem sobre as tensões estabelecidas nas cadeias de isoladores, para descargas no topo da torre ou cabo guarda.

4.1.1 Avaliação do efeito de torres adjacentes nas tensões verificadas sobre as cadeias de isoladores de isoladores

A Figura 4.1, mostra a simulação da descarga atmosférica atingindo o cabo guarda/topo da torre, para o arranjo com uma torre.

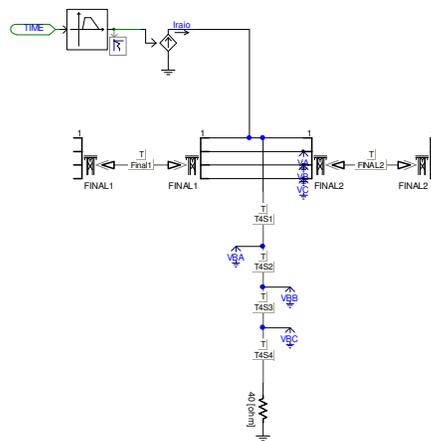


Figura 4.1: Diagrama de uma torre no programa PSCAD.

A Figura 4.2 mostra a simulação da descarga atmosférica atingindo o cabo guarda/topo da torre, para um arranjo com três torres, ou seja, uma torre adjacente de cada lado da torre atingida pela descarga atmosférica.

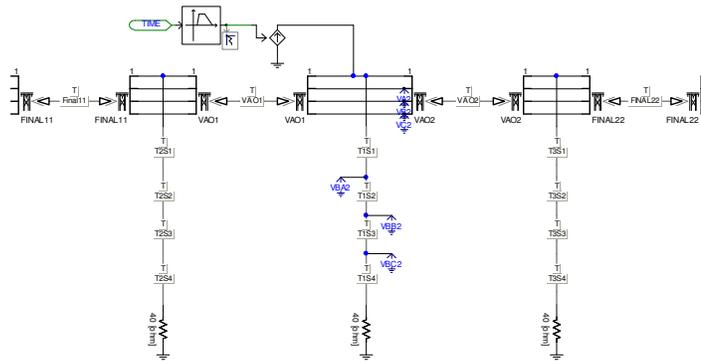


Figura 4.2: Diagrama de três torres no programa PSCAD.

A Figura 4.3 apresenta as tensões estabelecidas sobre as cadeias de isoladores das fases A, B e C, para um arranjo sem torres adjacentes e outro arranjo com uma torre adjacente em cada lado da torre atingida. É possível constatar a influência do aterramento e das torres adjacentes na tensão transitória sobre as cadeias de isoladores, resultante de uma descarga atmosférica.

O primeiro efeito na atenuação da tensão sobre as cadeias de isoladores é proporcionado pelo aterramento da própria torre atingida pela descarga. Em função do comprimento da torre de 27m, esta atenuação ocorre em torno de $0,2 \mu\text{s}$ conforme indicado no círculo de número 1 da Figura 4.3. O segundo efeito aparece no tempo de $2,3\mu\text{s}$, indicado pelo círculo de número 2. Percebe-se a influência das torres adjacentes na tensão sobre os isoladores, para o vão da linha considerado (350 m). O comprimento do trecho total de ida e volta da onda incidente e refletida é de 700 m que, dividido pela velocidade da luz, dá um tempo de trânsito de $2,33 \mu\text{s}$. Nota-se que as tensões V_{sn} (2A, 2B e 2C) têm uma menor tensão sobre as cadeias de isoladores, se comparada com as tensões V_{sn} (1A, 1B e 1C), a partir deste ponto.

O efeito das torres adjacentes se deve à contribuição do seu aterramento, uma vez que as ondas incidentes viajam até a resistência de aterramento das torres adjacentes. Caso a resistência de aterramento seja menor que a impedância da torre, uma onda de polaridade

inversa é refletida para o topo da torre sob análise atenuando a tensão resultante nas cadeias de isoladores.

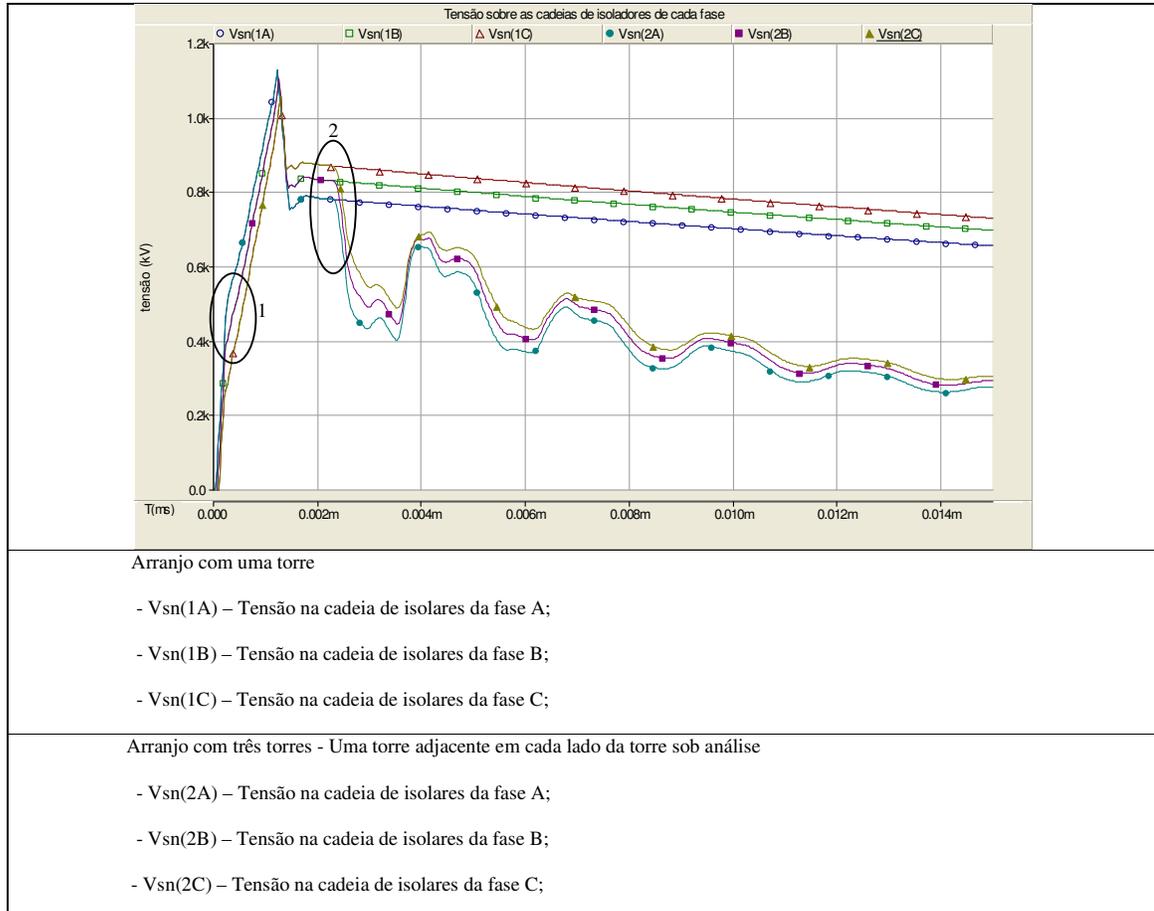


Figura 4.3: Tensões sobre as cadeias de isoladores – Influência das torres adjacentes.

Pode-se visualizar melhor os dois pontos referidos pela análise da Figura 4.4 a seguir.

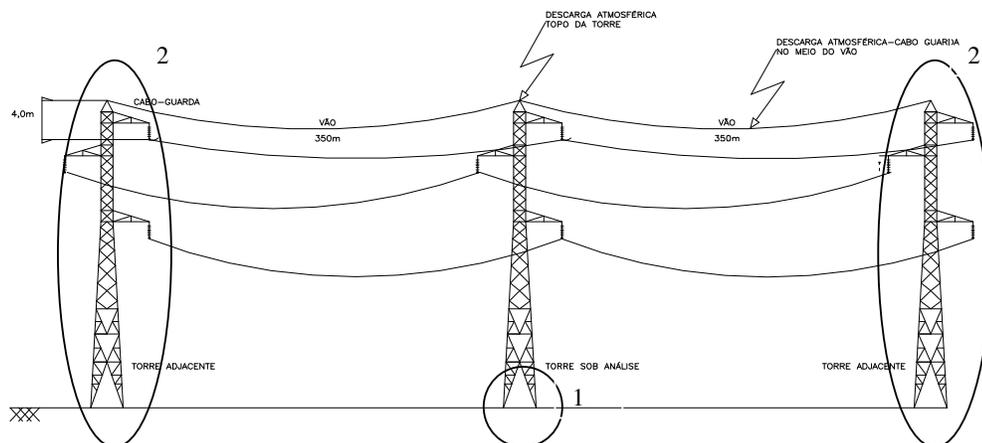


Figura 4.4: Efeito da resistência de aterramento e torre adjacente.

4.1.2 Avaliação do efeito do comprimento dos vãos nas tensões sobre os isoladores

A Figura 4.5, apresenta as tensões sobre as cadeias de isoladores para os arranjos com vãos de 250m e 350m. É possível verificar que as curvas para o arranjo de vão de 250m sofrem uma forte atenuação nos valores de tensão no instante de 1,8 μ s (círculo 1 da Figura 4.5). Tal valor é equivalente ao tráfego da onda incidente/refletida percorrendo uma distância de 500m (2 x 250m) entre o ponto de incidência da descarga atmosférica e o aterramento da torre adjacente. A atenuação para o arranjo com vão de 350m ocorre em 2,33 μ s (círculo 2 da Figura 4.5).

Pode-se deduzir que, quanto menor o vão entre duas torres, mais rápido a contribuição das torres adjacentes chega na torre atingida, atenuando as tensões estabelecidas sobre as cadeias de isoladores.

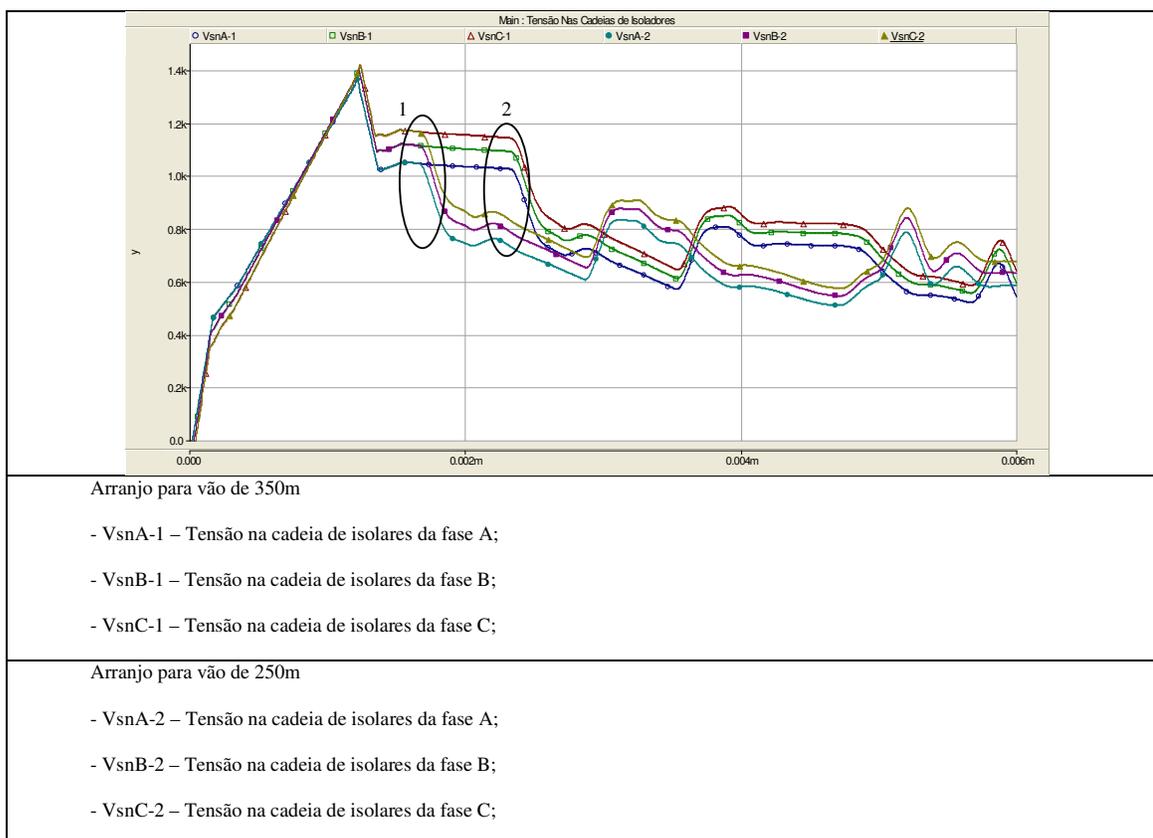


Figura 4.5: Tensões sobre as cadeias de isoladores – Influência do comprimento do vão.

4.1.3 Avaliação do efeito da resistência de aterramento nas tensões sobre os isoladores

A Figura 4.6 apresenta os resultados das tensões estabelecidas sobre a cadeia de isoladores da fase C, variando-se a resistência de aterramento da torre sob análise.

Pode-se observar que para valores de resistência de aterramento menores verificam-se tensões resultantes sobre as cadeias de isoladores menores.

Esse efeito pode ser explicado pela teoria de propagação de onda em linhas monofásicas [2]. Para os casos extremos onde se tem uma resistência de aterramento igual a 0, a onda refletida de tensão se propaga com a mesma amplitude da onda incidente porém com polaridade inversa. Em outras palavras, caso tivéssemos um torre com resistência de aterramento igual a 0, a tensão imposta sobre a cadeia de isoladores, devida a uma descarga atmosférica, seria totalmente atenuada no momento que a onda refletida no sistema de aterramento chegasse ao topo da torre.

Caso tivéssemos uma torre com resistência de aterramento de mesmo valor à impedância de surto da torre, a contribuição do sistema de aterramento seria nula (casamento de impedância) e finalmente para o caso de resistência de aterramento tendendo para o infinito teríamos uma onda de tensão refratada igual ao dobro da onda incidente.

O coeficiente de reflexão de uma onda é o fator que determina o percentual da onda incidente que a onda refletida assumirá. O coeficiente de reflexão no pé da torre pode ser obtido a partir da Expressão 4.1.

$$\Gamma_r = \frac{R - Z_t}{R + Z_t}, \text{ onde} \quad (4.1)$$

- R – Resistência de aterramento da torre;

- Z_t – Impedância da torre.

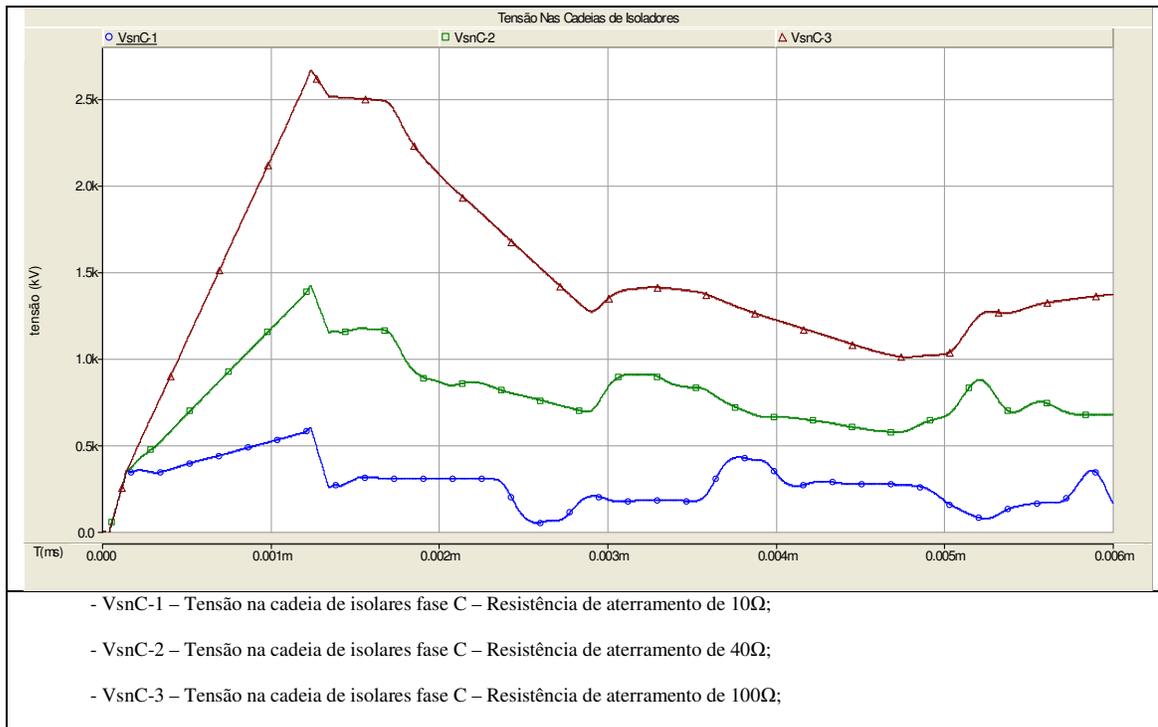


Figura 4.6: Tensões sobre as cadeias de isoladores – Influência da resistência de aterramento.

4.1.4 Avaliação do ponto de incidência da descarga atmosférica na LT

A Figura 4.7, apresenta os resultados das tensões estabelecidas sobre a cadeia de isoladores da fase A, considerando a descarga atmosférica no topo da torre e as tensões para a descarga atmosférica incidindo no cabo guarda no meio do vão.

Pode-se concluir que a tensão sobre a cadeia de isoladores é ligeiramente maior para a ocorrência de descarga no topo da torre em comparação com a descarga no meio do vão. Esta diferença se deve principalmente à divisão de corrente que ocorre no ponto de impacto da descarga atmosférica. Para a descarga no meio do vão, a corrente de descarga que chega na torre, para impor a tensão sobre as cadeia de isoladores já é a metade da corrente da descarga atmosférica já que a impedância para os dois lados opostos ao ponto de impacto da descarga é a mesma.

Quando a corrente da descarga atmosférica chega ao topo da torre, esta se divide novamente em duas partes, uma que continua no cabo guarda e outra que flui pela torre. Neste caso, a corrente que flui pela torre é menor se comparada com a corrente que flui pela torre para uma descarga no topo da mesma. Tal corrente imporá uma sobretensão menor nos isoladores.

Apresentam-se na Figura 4.8 as correntes que fluem pela torre para uma mesma descarga atmosférica no topo da torre e no meio do vão. É possível verificar o maior valor de corrente fluindo pela torre para a ocorrência da descarga no topo da torre.

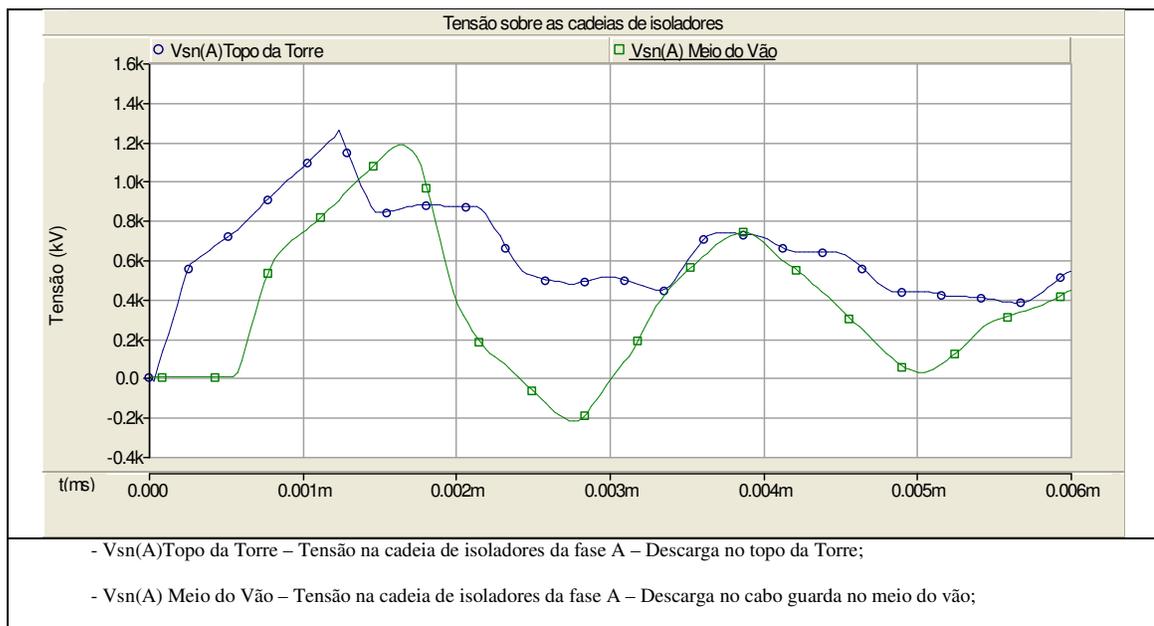


Figura 4.7: Tensões sobre a cadeia de isoladores – Influência do ponto de incidência da descarga.

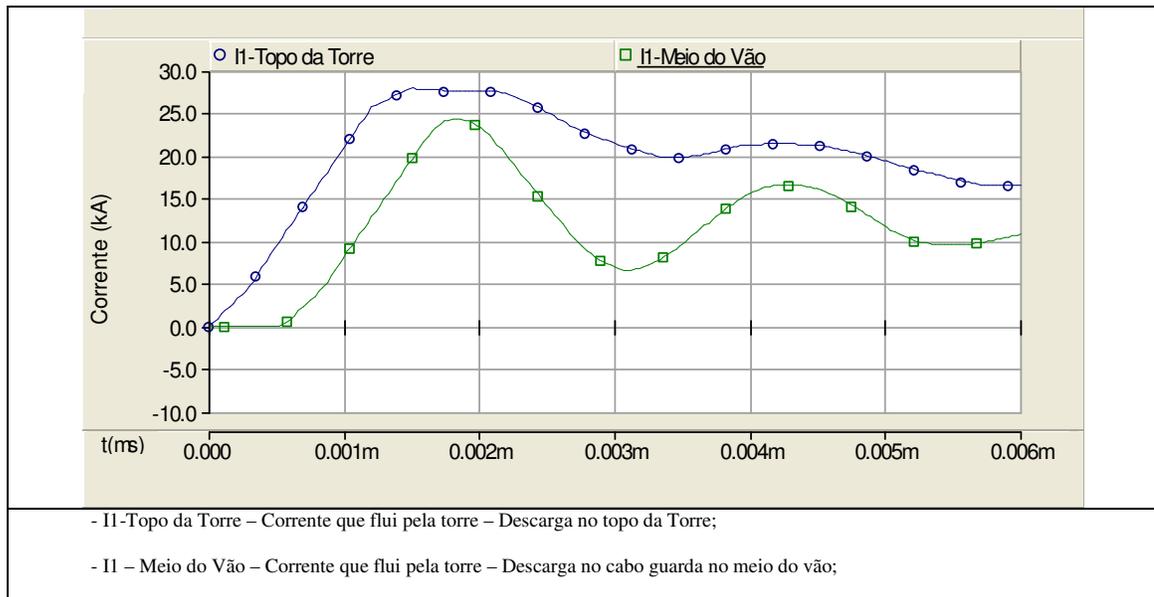


Figura 4.8: Corrente que flui pela torre.

4.2 AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE PÁRA-RAIOS

Apresenta-se neste item a análise da influência da aplicação de pára-raios nas LT no que se refere às tensões estabelecidas sobre as cadeias de isoladores, bem como a energia dissipada pelos pára-raios em cada caso. Os resultados obtidos permitem entender o comportamento das sobretensões e a energia a ser dissipada nos pára-raios.

A LT a ser modelada é a mesma utilizada na verificação das tensões estabelecidas nas cadeias de isoladores do item anterior.

O pára-raios ZnO a ser modelado tem as seguintes características: 120kV, 10 kA, 5,1 kJ/kV. Trata-se de um pára-raios comumente especificado para linhas de 138 kV, cujos parâmetros foram retirados do catálogo da ABB, pára-raios PEXLIM R [38].

4.2.1 Avaliação das tensões verificadas sobre as cadeias de isoladores

Foram simuladas diferentes configurações de aplicação de pára-raios na LT considerando sempre a presença do pára-raios em uma ou duas fases. Com os resultados, foi

possível demonstrar a influência benéfica da aplicação dos pára-raios, sobre as tensões estabelecidas nas cadeias de isoladores das fases.

4.2.1.1 Aplicação de pára-raios em duas fases;

A Figura 4.9 apresenta as sobretensões nas cadeias de isoladores, devidas a uma descarga atmosférica de 31,5kA, 1,2 x 50 μ s, para configuração sem pára-raios e com pára-raios em duas fases. Pode-se verificar que, para uma mesma descarga atmosférica, menores tensões são impostas aos isoladores, face à instalação de pára-raios.

Nota-se que a tensão estabelecida nas cadeias de isoladores, para o caso sem pára-raios tem um valor de pico de aproximadamente 1.600 kV nas três fases, enquanto que para o caso com instalação de pára-raios nas fases A e B o pico da tensão estabelecida é de aproximadamente 1.000 kV na fase C e 300kV nas fases A e B. Esta atenuação da tensão sobre a cadeia de isoladores deve-se à energia absorvida pelos pára-raios, que minimiza a corrente que flui na torre para o sistema de aterramento da mesma, minimizando a tensão estabelecida na torre.

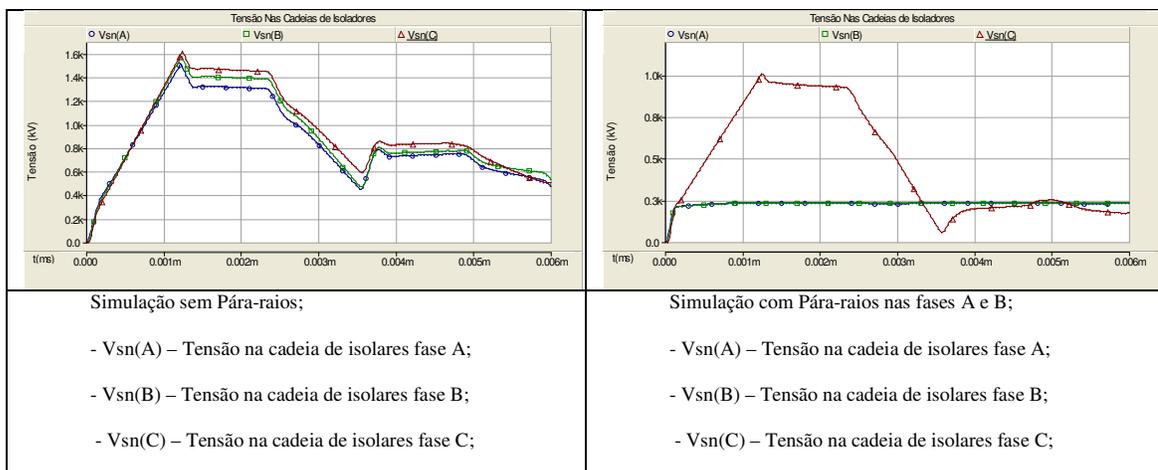


Figura 4.9: Tensões sobre as cadeias de isoladores – Pára-raios nas fases A e B.

Resultados semelhantes foram obtidos para a configuração com aplicação de apenas 1 pára-raios por torre.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados da máxima tensão verificada sobre as cadeias de isoladores sem pára-raios, para as diferentes configurações de aplicação de pára-raios investigadas. Nota-se que quando os pára-raios são instalados nas fases mais baixas em relação ao cabo guarda, têm-se sobretensões nas fases sem pára-raios, menores se comparadas aos demais casos. Isto se deve ao acoplamento estabelecido entre o cabo guarda e os cabos fase. Vale ressaltar que este efeito se intensifica com o aumento da resistência de pé de torre. De acordo com os resultados, é possível perceber que para torres com disposição dos condutores em alturas diferentes os melhores resultados podem ser obtidos com aplicação de pára-raios nas fases mais baixas ou mais distantes do cabo guarda, quando não são aplicados pára-raios nas três fases.

Tabela 4.1: Tensões sobre as cadeias de isoladores - Para diversos arranjos.

Casos	Fases com Pára-raios	Tensão máxima estabelecida sobre a cadeia de isoladores (kV)
1	A e B	1.000 (fase C)
2	A e C	953 (fase B)
3	B e C	904 (fase A)
4	A	1.230 (fase C)
5	B	1.209 (fase C)
6	C	1.196 (fase B)

4.2.2 Avaliação da energia dissipada pelos pára-raios

Foram simuladas diferentes configurações de aplicação de pára-raios na LT. Com os resultados, foi possível verificar a variação da dissipação da energia nos pára-raios em função da variação da característica de cada elemento conforme o foco da análise.

Apresenta-se na Figura 4.10, uma representação dos elementos da LT sob análise, ilustrando a descarga no topo da torre e no meio do vão e a presença de torres adjacentes além

da torre sob análise. Nas análises, quando se refere a uma torre adjacente, está se referindo ao caso ilustrado na Figura 4.10, ou seja uma torre adjacente em cada lado. Além disso, a Figura 4.9 ilustra o vão que é a seção da LT entre duas torres, assim como ilustra a primeira seção na torre de 4 metros que se localiza entre o topo da torre e o condutor da fase A. As demais seções são entre o condutor da fase A e o condutor da fase B, do condutor da fase B e da fase C e entre a fase C e o pé da torre.

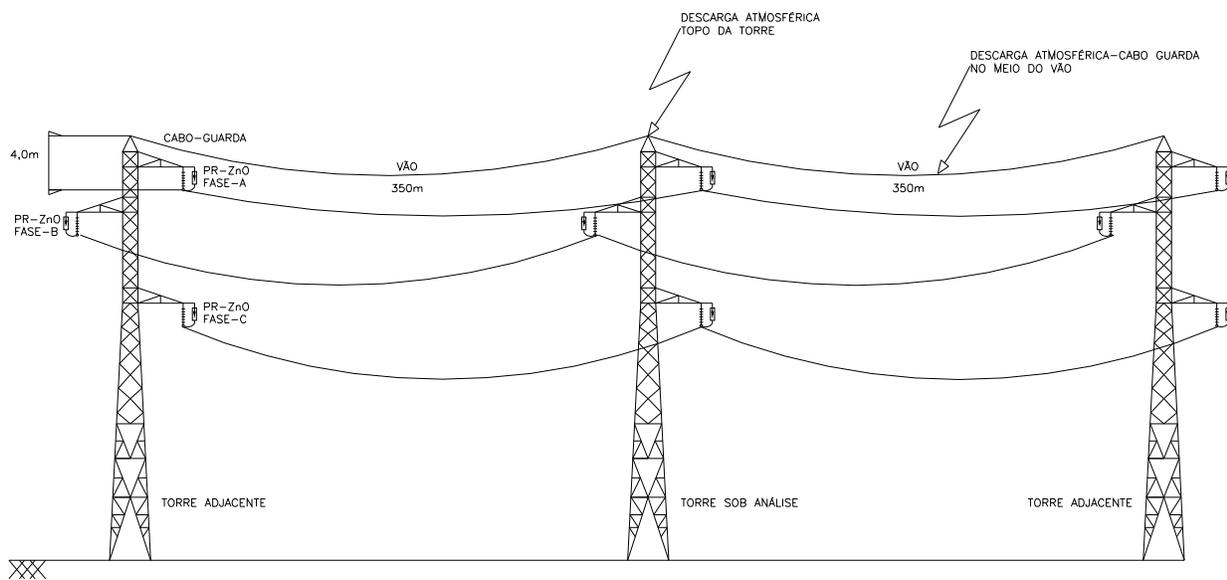


Figura 4.10: Desenho ilustrativo das torres simuladas

4.2.2.1 Efeito de torres adjacentes sem pára-raios

Neste item, foi avaliada a influência de torres adjacentes sobre a energia a ser dissipada pelos pára-raios, para uma descarga no topo da torre. Na torre sob análise, foram considerados pára-raios nas três fases.

A Tabela 4.2 e a Figura 4.11 apresentam os valores máximos de energia a ser dissipada em um pára-raios da torre atingida por uma descarga atmosférica de 31,5 kA – 1,2 x 50µs no topo da torre, em função do número de torres adjacentes consideradas.

Vale esclarecer que o valor “0” torres adjacentes indicado na Tabela 4.2, corresponde à simulação apenas da torre atingida. Uma torre adjacente consiste na simulação de 2 vãos de LT e uma torre em cada lado da torre atingida.

Pode-se observar que as torres adjacentes sem pára-raios contribuem de forma positiva, minimizando a energia a ser dissipada nos pára-raios. Além disso, a partir de 4 torres adjacentes a variação no montante de energia a ser absorvida pelos pára-raios é desprezível.

Ao longo do trabalho, as demais análises que envolveram levantamento da energia dissipada pelos pára-raios foram efetuadas modelando-se 5 torres adjacentes ao ponto de incidência da descarga atmosférica.

Tabela 4.2: Energia dissipada x N° de torres adjacentes - Sem pára-raios nas torres adjacentes.

N° de torres adjacentes ao ponto de incidência	Máxima energia dissipada pelo pára-raios (kJ)
0	23,49 (PR – Fase C)
1	6,32 (PR – Fase C)
2	4,25 (PR – Fase C)
3	4,08 (PR – Fase C)
4	4,06 (PR – Fase C)
5	4,01 (PR – Fase C)

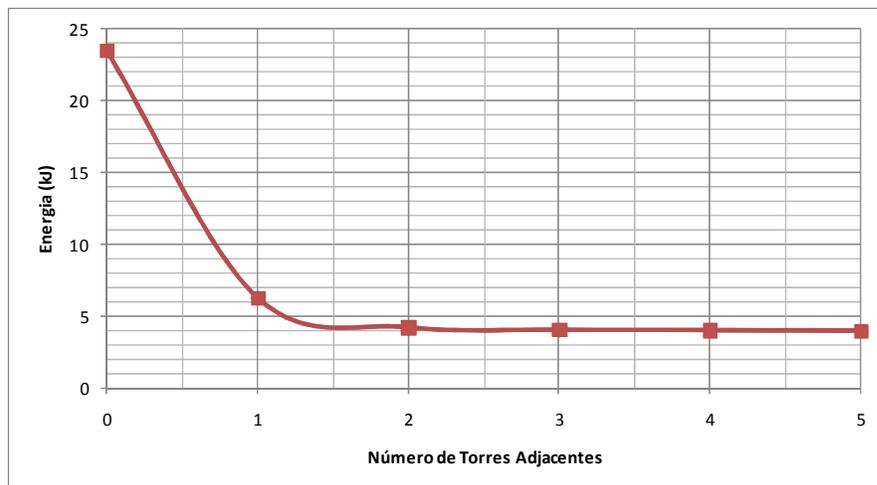


Figura 4.11: Energia dissipada x N° de torres adjacentes - Sem pára-raios nas torres adjacentes.

Para uma melhor visualização apresenta-se na Figura 4.12 a representação da simulação de uma torre adjacente e duas torres adjacentes.

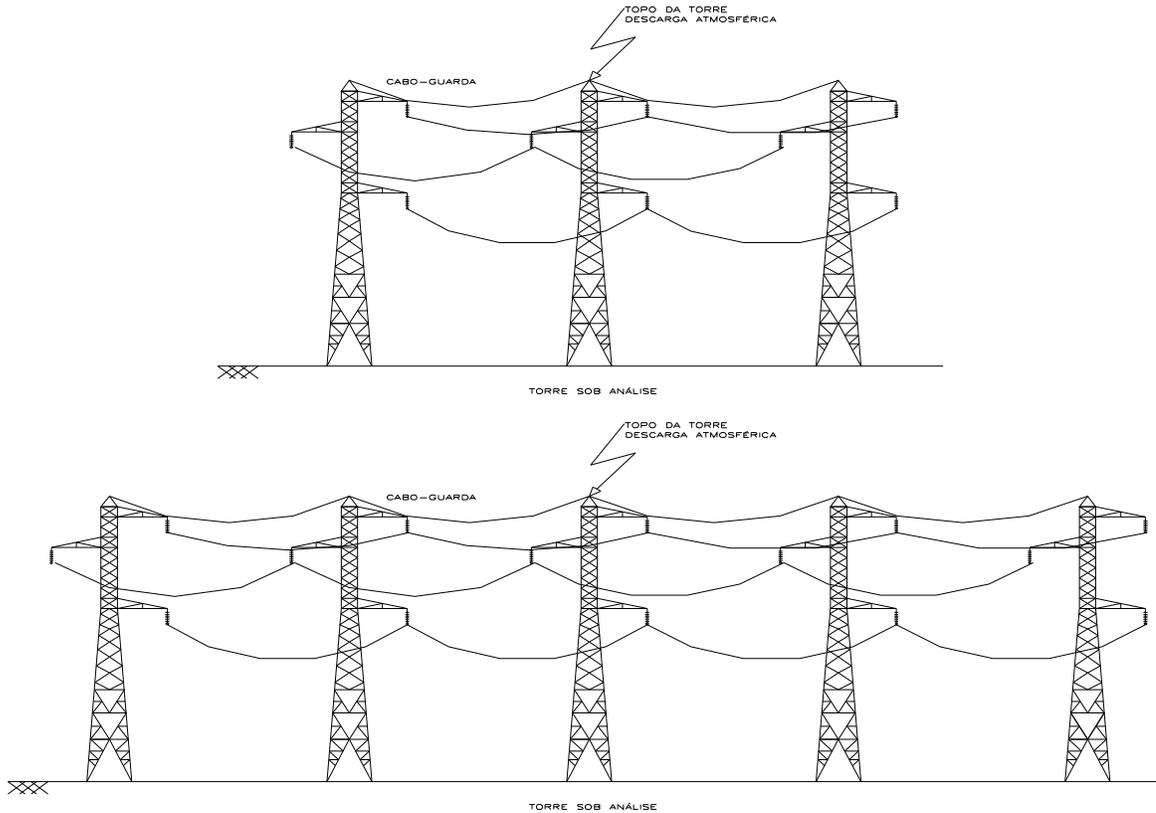


Figura 4.12: Desenho ilustrativo da Simulação de uma torre adjacente e duas torres adjacentes.

4.2.2.2 Efeito de torres adjacentes com pára-raios

Neste item foi avaliado o efeito que torres adjacentes com pára-raios têm sobre a energia a ser dissipada pelos pára-raios da torre sob análise, para descargas no topo da torre.

A Tabela 4.3 e a Figura 4.13 apresentam os resultados das simulações para o valor máximo de energia a ser dissipada por um pára-raios, devido a uma descarga atmosférica de 31,5kA - 1,2x50µs no topo da torre, em função do número de torres consideradas.

Observa-se que, desconsiderando-se o caso de “0” torres adjacentes, a presença de pára-raios nas torres adjacentes aumenta a energia a ser dissipada pelos pára-raios na torre atingida pela descarga atmosférica. Este efeito se deve às reflexões da onda de corrente nos pára-raios das torres adjacentes. Em conformidade com o conceito de propagação de ondas descrito no item 2.4, os pára-raios ZnO quando submetidos a uma descarga atmosférica comportam-se

como um circuito aberto antes de entrarem em operação. Porém quando o valor da tensão nos terminais do pára-raios atinge o valor da sua tensão nominal, seu comportamento muda assemelhando-se a um curto-circuito, para as ondas de corrente. Nessas condições quando o pára-raios entra em condução a corrente a ser drenada pelo mesmo provoca uma reflexão na corrente que segue em sentido oposto e mesma polaridade da onda incidente, seguindo na direção do ponto de origem da onda incidente. Com isso, quando a onda de corrente refletida na torre adjacente chega ao pára-raios da torre sob análise tem-se um aumento da corrente a ser drenada pelo mesmo.

Conforme pode-se observar na Tabela 4.3, à medida que aumenta-se o número de torres adjacentes os valores de energia tornam-se praticamente constantes. Antes da corrente de descarga se dissipar no pára-raios da 5ª torre, a descarga atmosférica sofreu pelo menos 6 subdivisões nas torres anteriores, e a onda de corrente que chega no pára-raios da 5ª torre já chega bem atenuada. Além disso, o tempo de trânsito imposto por 5 vãos representa um tempo da ordem de 11µs.

Tabela 4.3: Energia dissipada x N° de torres adjacentes – Com pára-raios nas torres adjacentes.

N° de torres adjacentes ao ponto de incidência	Máxima energia dissipada pelo pára-raios (kJ)
0	23,49 (PR – Fase C)
1	6,94 (PR – Fase C)
2	8,18 (PR – Fase C)
3	9,25 (PR – Fase C)
4	9,87 (PR – Fase C)
5	10,12 (PR – Fase C)

Os resultados obtidos tanto para a configuração com torres adjacentes com pára-raios como para a configuração de torres adjacentes sem pára-raios, são similares aos resultados presentes no documento referência [25].

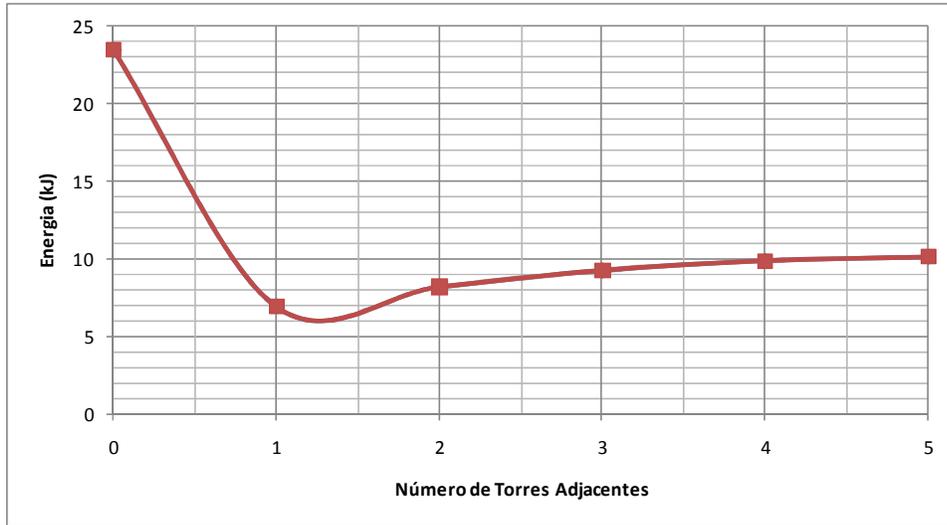


Figura 4.13: Energia dissipada x N° de torres adjacentes - Com pára-raios nas torres adjacentes.

Os resultados apresentados podem ser melhor entendidos a partir da análise da Figura 4.14 que apresenta as curvas das correntes drenadas pelos pára-raios das fases A, B e C da torre sob análise. É possível verificar o efeito que as reflexões das ondas de corrente dos pára-raios das torres adjacentes impõem sobre os pára-raios da torre sob análise.

Conforme mostram os resultados, o primeiro efeito da reflexão ocorre a aproximadamente $2,6 \mu\text{s}$. Este efeito é comprovado a partir da contabilização da distância total a ser percorrida pela onda incidente e a onda refletida no trecho entre o pára-raios da fase A da torre sob análise e o pára-raios da fase A da torre adjacente, que é de 712m. Dividindo-se essa distância pela velocidade de propagação, tem-se o tempo de trânsito de $2,4 \mu\text{s}$, coerente com o resultado indicado no círculo 1 da Figura 4.14.

O segundo efeito da reflexão ocorre a aproximadamente $5,0 \mu\text{s}$, contabilizando a distância total a ser percorrida pela onda incidente e a onda refletida no trecho entre o pára-raios da fase A e o pára-raios da fase A da primeira torre após a torre adjacente, que é de 1.412m. Dividindo-se essa distância pela velocidade de propagação, tem-se o tempo de transito de $4,7 \mu\text{s}$, coerente com o resultado indicado no círculo 2 da Figura 4.14.

Os tempos de trânsito verificados nas demais reflexões são coerentes com as distâncias envolvidas, atestando que os pára-raios nas torres adjacentes realmente elevam a energia a ser dissipada nos pára-raios alocados na torre sob análise.

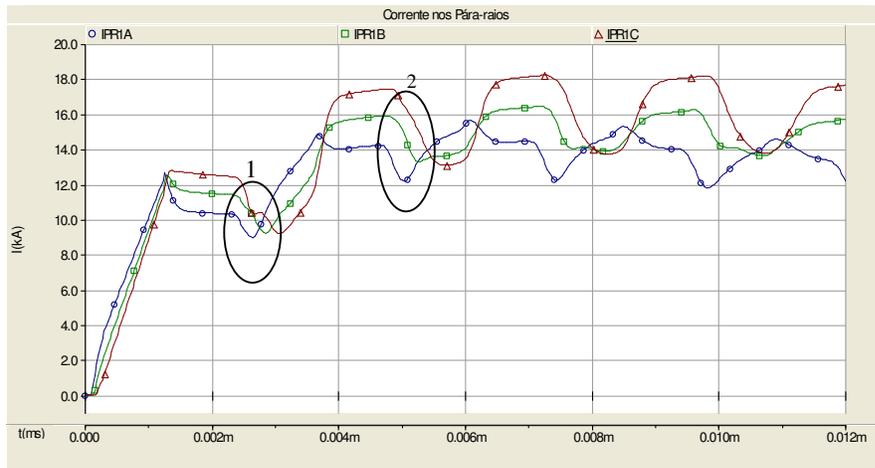


Figura 4.14: Correntes de descarga nos pára-raios

4.2.2.3 Avaliação do efeito do comprimento dos vãos de uma LT

A Tabela 4.4 apresenta os resultados das simulações para o valor máximo de energia a ser dissipada por um pára-raios, devido a uma descarga atmosférica de 31,5kA - 1,2x50µs no topo da torre, em função do comprimento dos vãos da LT e considerando a presença de 5 torres adjacentes com pára-raios instalados nas mesmas.

Conforme pode ser observado, quanto maiores os comprimentos dos vãos, maiores são os valores de energia a serem dissipadas nos pára-raios. Isto se explica pelo fato da contribuição do sistema de aterramento da torre adjacente levar um tempo maior para surtir efeito sobre a tensão estabelecida na torre atingida pela descarga atmosférica.

Tabela 4.4: Energia dissipada nos pára-raios em função do comprimento dos vãos.

Comprimento dos Vãos (m)	Máxima energia dissipada pelos pára-raios (kJ)
100	2,13 (PR – Fase C)
200	3,89 (PR – Fase C)
400	6,04 (PR – Fase C)
800	8,74 (PR – Fase C)
1.600	10,81 (PR – Fase C)

4.2.2.4 Avaliação do efeito da resistência de aterramento

Para a avaliação do efeito da resistência de aterramento foi admitido que todas as torres possuem pára-raios instalados nas três fases.

A Tabela 4.5, apresenta os resultados das simulações para o valor máximo de energia a ser dissipada por um pára-raios, devido a uma descarga atmosférica de 31,5kA - 1,2x50µs no topo da torre, em função da resistência de aterramento das torres e considerando a presença de 5 torres adjacentes com pára-raios instalados nas mesmas. Conforme mostrado, o efeito da resistência de aterramento sobre a energia a ser dissipada nos pára-raios é tal que quanto maior a resistência de aterramento maior é a energia a ser dissipada pelos pára-raios. Isto se deve aos efeitos de reflexão das ondas no sistema de aterramento das torres.

Tabela 4.5: Energia dissipada nos pára-raios em função da resistência de aterramento.

Resistência de pé de torre (Ω)	Máxima energia dissipada pelo pára-raios (kJ)
10	0,10 (PR – Fase C)
50	6,58 (PR – Fase C)
100	14,25 (PR – Fase C)
500	29,21 (PR – Fase C)
1.000	35,59 (PR – Fase C)

4.2.2.5 Avaliação do ponto de incidência da descarga atmosférica na LT

A análise foi efetuada com a finalidade de avaliar a influência que o ponto de incidência da descarga atmosférica exerce sobre a energia a ser dissipada pelos pára-raios, isto é identificar se existem diferenças nos montantes de energia devidos às descargas no topo da torre em comparação com as descargas no meio do vão.

A Tabela 4.6, apresenta os resultados das simulações para o valor máximo de energia a ser dissipada por um pára-raios, devido a uma descarga atmosférica de 31,5kA - 1,2x50µs no topo da torre, em função do ponto de incidência da descarga atmosférica, número de pára-

raios por estrutura e considerando a presença de 5 torres adjacentes com pára-raios instalados nas mesmas.

Através da análise dos resultados, pode se observar que descargas no topo da torre apresentam maiores valores de energia dissipada pelos pára-raios em relação às descargas no meio do vão. Além disso, os pára-raios da fase inferior apresentam sempre a maior dissipação de energia. Isto se deve ao menor coeficiente de acoplamento das fases mais inferiores com o cabo guarda, o que proporciona a maior sobretensão na cadeia de isoladores desta fase.

Tabela 4.6: Energia dissipada em função do ponto de incidência da descarga atmosférica.

Pára-raios por torre	Energia Dissipada pelo pára-raios (kJ)					
	Descargas no topo da torre			Descargas Cabo Guarda no meio do vão		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
3 (A-B-C)	6,2	8,1	10,2	3,1	3,4	4,0
2 (A – B)	8,8	12,3	-	4,0	5,2	-
2 (B – C)	-	9,9	12,1	-	4,3	4,9
2(A – C)	8,3	-	13,6	4,0	-	5,4
1(A)	13,9	-	-	6,4	-	-
1(B)	-	16,2	-	-	7,0	-
1(C)	-	-	17,3	-	-	7,2

4.2.2.6 Avaliação do efeito das descargas múltiplas e do valor de pico das descargas atmosféricas

A presente análise foi efetuada com a finalidade de constatar a influência que as descargas múltiplas e o valor de pico das correntes de descarga atmosférica têm na dissipação de energia dos pára-raios.

Em conformidade com o item 2.2.2, foram admitidas 3 descargas subseqüentes com intensidade 40% da primeira descarga, tempos de frente e cauda iguais à primeira descarga, conforme apresentado na Figura 4.15.

A Figura 4.15 apresenta a forma de onda da descarga atmosférica com três descargas subseqüentes, para o primeiro caso cujo valor de pico é de 31,5kA.

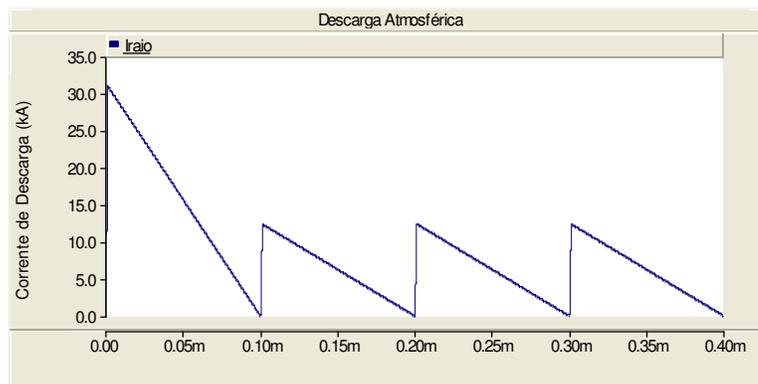


Figura 4.15: Forma de onda da descarga atmosférica com 3 descargas subsequentes.

A Tabela 4.7 apresenta os resultados das simulações para o valor máximo de energia a ser dissipada por um pára-raios, devido a uma descarga atmosférica no topo da torre, em função da multiplicidade e do valor de pico de corrente das descargas atmosféricas. Para as simulações, foram consideradas a presença de 5 torres adjacentes com pára-raios instalados nas mesmas.

Conforme os resultados das simulações, as diferenças verificadas entre não considerar as descargas subsequentes e considerar as descargas subsequentes são de 12,7% para o menor valor de pico da descarga atmosférica (31,5kA), e de 26% para o valor mais elevado (100kA).

De acordo com os resultados, a multiplicidade das descargas atmosféricas é um fator importante a ser considerado na análise de dissipação de energia dos pára-raios, uma vez que as diferenças verificadas não são reduzidas e esta influência se torna maior à medida que o valor de pico da primeira descarga atmosférica possui valores mais elevados.

Para análise da máxima energia a ser dissipada pelos pára-raios é importante a consideração de descargas subsequentes nas análises.

Tabela 4.7: Energia dissipada em função da multiplicidade e valor de pico das correntes de descarga.

Casos	Valor de Pico da Corrente (kA)	Energia dissipada pelos pára-raios 1 descarga (kJ)	Energia dissipada pelos pára-raios 1 descarga + 3 subseqüentes(kJ)	Diferença (%)
1	31,5	10,2	11,5	12,7
2	60	46,9	57,1	21,7
3	100	122,0	153,7	26,0

Este capítulo apresentou a análise de sensibilidade sobre a influência que diferentes elementos da modelagem da LT exercem sobre os resultados. Isto possibilitou o conhecimento quantitativo sobre as respostas esperadas devido às modificações implementadas em um projeto de linha.

O Capítulo 5 a seguir, apresenta o estudo de casos onde foi avaliado o desempenho de uma LT e propostas duas alternativas de melhoria.

5 ESTUDO DE CASOS

Este capítulo é destinado à avaliação do montante de energia a ser drenada pelos pára-raios. Para isso, foram efetuados dois estudos distintos, porém complementares. No primeiro estudo, foi calculado o desempenho de uma LT com o auxílio do programa Flash. Também foi estudada a possibilidade de melhoria do desempenho da mesma, simulando-se o efeito de aplicação de pára-raios de linha por meio de um artifício de simulação. No segundo estudo, foi feita uma análise dos montantes de energia a serem dissipados nos pára-raios, e a partir dos resultados apresentados no primeiro estudo, foram avaliados dois casos distintos a saber:

Caso 1: Aplicação de pára-raios em todas as torres da LT;

Caso 2: Aplicação de pára-raios somente em torres previamente definidas.

5.1 O PROGRAMA FLASH

O cálculo do desempenho de uma linha de transmissão frente às descargas atmosféricas pode ser feito utilizando-se o programa FLASH, que segue a metodologia recomendada pelo IEEE - The Institute of Electrical and Electronics Engineers [1].

Tal programa permite estimar separadamente o número de desligamentos provocados por falhas de blindagem (descarga incidente no condutor fase), comumente designados por “flashover”, e por descargas atmosféricas que atingem o cabo guarda ou o topo da torre, comumente designados por “backflashover”.

O programa segue a metodologia denominada “Método dos dois pontos” que se baseia na determinação da tensão estabelecida sobre a cadeia de isoladores, devido à ocorrência de uma descarga atmosférica, em dois momentos específicos.

A tensão estabelecida sobre a cadeia de isoladores devido a uma descarga atmosférica é comparada com a curva v_{xt} da cadeia de isoladores nos instantes $2,0\mu s$ e $6,0\mu s$. Se a tensão estabelecida é superior à suportável pela cadeia, este evento é contabilizado como um desligamento.

A metodologia leva em consideração uma série de variáveis aleatórias e pré-definidas pelo usuário que permitem estimar o número de desligamentos/100km/ano, previstos para uma dada LT.

As seguintes variáveis são consideradas: o nível cerâmico da região, tempo de frente e o valor de pico da descarga incidente, a reflexão em torres adjacentes, o efeito corona, o ponto de incidência da descarga atmosférica, a tensão suportável pela cadeia de isoladores, o acoplamento entre condutores e cabos guarda, a impedância de surto do cabo guarda e da torre, a estimativa do número de descargas na torre pelo modelo eletrogeométrico, tempo de frente da descarga atmosférica, a resistência de aterramento da torre e sua redução em função da ionização do solo no momento da descarga, a tensão nominal de cada fase considerando o defasamento entre elas, acrescida à tensão que se estabelece sobre o isolador devido à descarga atmosférica.

5.2 DADOS NECESSÁRIOS PARA O CÁLCULO DO DESEMPENHO

Para a modelagem da LT, foram levantadas todas as características necessárias para o estudo, tais como as resistências de aterramento das torres, dimensões das torres da LT, disposição dos condutores e cabos guarda, etc.

O programa Flash foi utilizado para estimar o desempenho de uma LT com características extremamente desfavoráveis e avaliar a influência dos pára-raios no desempenho.

Para a simulação do efeito de pára-raios partiu-se do pressuposto de que a presença deste equipamento praticamente elimina a possibilidade de falhas por descarga atmosférica na torre com os pára-raios. Efetuando-se simulações no programa FLASH, foi constatado que, para linhas de transmissão com resistência de aterramento muito baixa, aproximadamente zero, não são esperados desligamentos por descargas atmosféricas.

Este efeito se deve à influência das reflexões de onda, durante uma descarga atmosférica.

O programa Flash permite a simulação de uma LT com inclusão dos valores de resistência de aterramento que podem ser divididas em até 10 faixas de valores distintos. Cada faixa corresponde a um percentual do comprimento total da LT. O programa realiza o cálculo do desempenho para cada faixa de resistência de aterramento e realiza uma média aritmética ponderada em função do percentual que cada faixa apresenta, chegando-se assim ao desempenho esperado para uma dada LT.

5.3 CÁLCULO DO DESEMPENHO DA LT

No caso estudado, a geometria das torres mostra-se altamente eficaz na proteção da LT contra as falhas de blindagem. Pode-se esperar, para esse tipo de ocorrência, um número de desligamentos igual a zero em todas as situações analisadas. É importante observar que isso não significa que os condutores não serão atingidos pelas descargas, mas que as descargas que vierem a atingir os mesmos serão de baixa intensidade, incapazes de provocar desligamentos.

Os desligamentos provocados por “backflashover”, entretanto, são relativamente elevados devido ao alto nível cerâmico e à elevada resistividade do solo.

Atualmente, a legislação brasileira admite como aceitável o desempenho de uma LT de 230 kV, com no máximo 2 desligamentos / 100 km/ano. As simulações iniciais efetuadas apontarão quais as ações necessárias para a obtenção deste desempenho [30].

5.3.1 Dados da LT:

Apresenta-se, na Figura 5.1, a silhueta da torre sob análise, bem como as dimensões e disposição dos cabos na mesma.

- LT 230 kV, circuito simples, um condutor por fase, 89 km de extensão e 171 torres;
- Condutores: 795 MCM;
- Altura típica da torre: 22,5 m;
- Disposição dos condutores:(Ver Figura 5.1);
- Raio médio geométrico dos condutores: 0,01073m;
- Resistência DC dos condutores: 0,0802 Ω /km;
- Flecha dos condutores: 17,1m;
- Comprimento da cadeia de isoladores: 2,6m;
- 2 Cabos guarda (EHS 3/8”);
- Disposição dos pára-raios: (Ver Figura 5.1);
- Raio dos cabos guarda: 0,0147 m;
- Resistência DC dos cabos guarda: 0,511 Ω /km;
- Flecha dos cabos guarda: 15,4m.
- Vão médio: 460m;
- Nível cerâmico: 70 dias de trovoada por ano

Apresenta-se na Tabela 5.1, os valores de resistência de aterramento de cada torre.

Tabela 5.1 - Resistência de aterramento das torres:

N° torre	R _{at} (Ω)								
1	18	37	49	73	18	109	22	145	51
2	16	38	53	74	20	110	16	146	76
3	70	39	129	75	54	111	21	147	16
4	45	40	57	76	52	112	72	148	32
5	35	41	42	77	27	113	49	149	39
6	37	42	83	78	15	114	34	150	37
7	30	43	73	79	96	115	224	151	18
8	22	44	64	80	42	116	150	152	40
9	84	45	103	81	16	117	80	153	48
10	21	46	15	82	37	118	27	154	36
11	21	47	18	83	42	119	156	155	69
12	19	48	33	84	32	120	36	156	250
13	17	49	29	85	28	121	66	157	168
14	17	50	32	86	45	122	15	158	74
15	17	51	23	87	29	123	236	159	80
16	48	52	18	88	205	124	49	160	97
17	54	53	19	89	125	125	44	161	46
18	41	54	18	90	72	126	183	162	23
19	66	55	17	91	42	127	64	163	137
20	27	56	15	92	22	128	89	164	44
21	38	57	36	93	57	129	39	165	45
22	24	58	34	94	34	130	33	166	121
23	69	59	23	95	37	131	25	167	74
24	70	60	56	96	73	132	53	168	27
25	86	61	87	97	16	133	16	169	11
26	22	62	293	98	83	134	144	170	38
27	71	63	46	99	24	135	40	171	31
28	71	64	16	100	219	136	83		
29	61	65	39	101	21	137	93		
30	58	66	93	102	15	138	19		
31	40	67	68	103	24	139	54		
32	24	68	74	104	11	140	76		
33	26	69	53	105	441	141	52		
34	20	70	118	106	157	142	17		
35	26	71	118	107	195	143	35		
36	50	72	110	108	119	144	298		

5.3.2 Cálculo de desempenho da LT sob análise Com Uso do Programa Flash

5.3.2.1 Cálculo do desempenho da LT sem pára-raios

Para um melhor detalhamento das resistências típicas por trecho, a LT foi dividida em três trechos de aproximadamente 30 km. Nestes trechos, foram utilizadas as resistências de aterramento das torres apresentadas na Tabela 5.1. Para cada trecho, calculou-se a resistência média de aterramento obtendo-se faixas de resistência de aterramento e o percentual que cada faixa representa no trecho.

As Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4 apresentam as distribuições das resistências de aterramento das estruturas para os trechos 1, 2 e 3 respectivamente. Pode-se observar uma grande variação das faixas de resistência de aterramento média e percentuais significativos de resistências de aterramento médias elevadas.

Tabela 5.2 – Resistência de aterramento - Trecho – 1 (Torre 1 à torre 57).

Faixa	Resistência média (Ω)	Porcentagem de torres no trecho (%)
0-20 Ω	17	27
20-25 Ω	22	11
25-35 Ω	30	13
35-40 Ω	37	5
40-45 Ω	42	6
45-50 Ω	47	6
50-65 Ω	57	12
65-100 Ω	70	17
100-acima Ω	211	3

Tabela 5.3 - Resistência de aterramento - Trecho – 2 (Torre 58 à Torre 114).

Faixa	Resistência média (Ω)	Porcentagem de torres no trecho (%)
0-20 Ω	16	22
20-25 Ω	22	7
25-35 Ω	30	14
35-40 Ω	37	5
40-45 Ω	42	7
45-50 Ω	47	4
50-65 Ω	53	4
65-100 Ω	80	17
100-acima Ω	175	20

Tabela 5.4 – Resistência de aterramento - Trecho – 3 (Torre 115 à Torre 171).

Faixa	Resistência média (Ω)	Porcentagem de torres no trecho (%)
0-20 Ω	17,0	12,0
20-25 Ω	23,0	2,0
25-35 Ω	30,0	19,0
35-40 Ω	37,0	14,0
40-45 Ω	43,0	7,0
45-50 Ω	47,0	7,0
50-65 Ω	55,0	5,0
65-100 Ω	79,0	19,0
100-acima Ω	156,0	15,0

Para se ter uma melhor visão da distribuição da resistência de aterramento das torres, as Figuras 5.2, 5.3 e 5.4, apresentam as distribuições das resistências de aterramento das estruturas para os trechos 1, 2 e 3 respectivamente,.

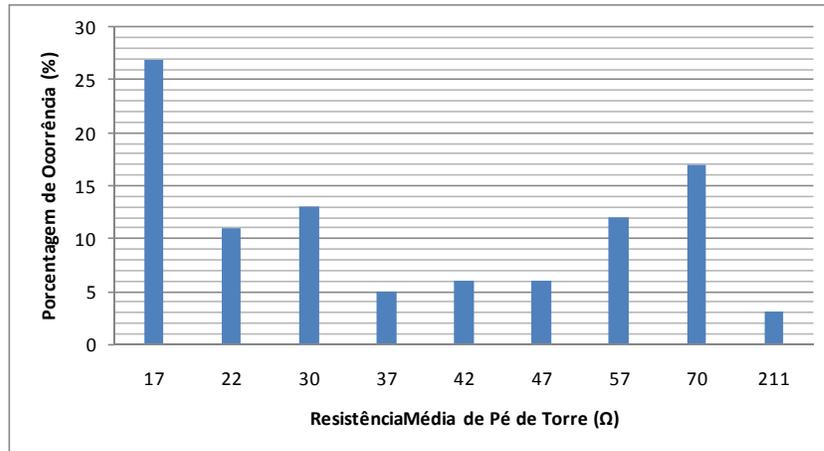


Figura 5.2 – Resistência de aterramento das torres – Trecho 1.

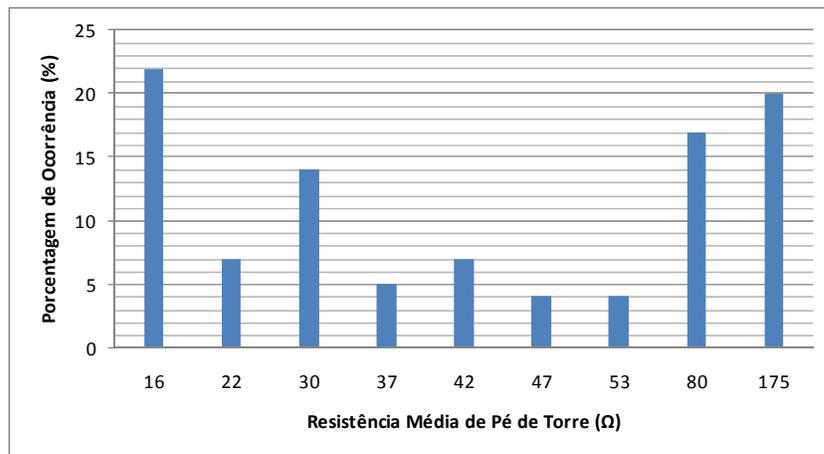


Figura 5.3 – Resistência de aterramento das torres – Trecho 2.

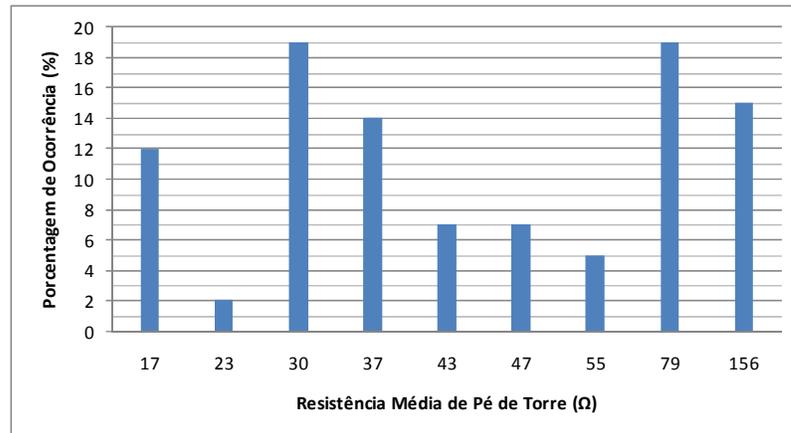


Figura 5.4 – Resistência de aterramento das torres – Trecho 3.

Os três trechos descritos foram modelados no programa Flash, onde foram obtidos os valores de desempenho apresentados na Tabela 5.5.

Conforme pode-se se observar, os números de desligamentos obtidos para cada trecho estão bem acima do aceitável. Para o trecho 2 por exemplo, foi obtido um desempenho de 12,5 desligamentos/100km/ano, valor inadmissível para uma linha de 230 kV. Os três trechos juntos apresentam um desempenho médio de 10,3 desligamentos/100km/ano. Para uma LT de 89km este valor corresponde a 9,2 desligamentos por ano.

Tabela 5.5 – Desligamentos por Backflashover – Trechos 1, 2 e 3

Trecho	Ng (desc./km ² /ano)	Nº de desligamentos/100km/ano
1	8,1	7,12
2		12,56
3		11,41
Média:		10,3

5.3.2.2 Cálculo do desempenho da LT com pára-raios

Conforme apresentado no item anterior, a LT sob análise apresentou um péssimo desempenho frente às descargas atmosféricas.

Neste item apresenta-se a simulação da mesma LT, porém considerando a aplicação de pára-raios ZnO, buscando-se aplicar o menor número possível destes equipamentos para a obtenção de um desempenho desejável.

Os procedimentos de rede do ONS, sub-módulo 2.4 [30], apresentam como aceitável o valor de 2 desligamentos / 100km / ano, o qual foi tomado como referência.

Uma vez que os pára-raios praticamente eliminam a possibilidade de desligamentos por descarga atmosférica numa referida torre, para a simulação do efeito dos pára-raios ZnO no programa Flash, foi adotada uma resistência de aterramento próxima a zero ($R = 0,01 \Omega$) nas torres em que se considerou a instalação dos mesmos,.

Foram feitas simulações diversas e análise dos resultados com a aplicação de pára-raios ZnO em torres com resistência de aterramento na faixa máxima (100 Ω e acima) e nas faixas inferiores cumulativamente, até a obtenção do valor desejado de 2 desligamentos / 100 km/ano. Essa condição foi obtida para a faixa 50 a 65 Ω nos trechos 1 e 2, e 45-50 Ω no trecho 3.

As Tabelas 5.6, 5.7 e 5.8 apresentam as novas faixas de resistência de aterramento, considerando a instalação de pára-raios ZnO.

Tabela 5.6 – Resistência de aterramento – Adequação Trecho – 1 (Torre 1 à Torre 57)

Faixa	Resistência média (Ω)	Porcentagem de torres no trecho (%)
0-20 Ω	17	27
20-25 Ω	22	11
25-35 Ω	30	13
35-40 Ω	37	5
40-45 Ω	42	6
45-50 Ω	47	6
50-65 Ω	0,01 [1]	12
65-100 Ω	0,01 [1]	17
100-acima Ω	0,01 [1]	3

[1] – Aplicação de pára-raios de LT nas três fases de cada torre das faixas indicadas.

Tabela 5.7 – Resistência de aterramento – Adequação Trecho – 2 (Torre 58 à Torre 111).

Faixa	Resistência média (Ω)	Porcentagem de torres no trecho (%)
0-20 Ω	16	22
20-25 Ω	22	7
25-35 Ω	30	14
35-40 Ω	37	5
40-45 Ω	42	7
45-50 Ω	47	4
50-65 Ω	0,01 [1]	4
65-100 Ω	0,01 [1]	17
100-acima Ω	0,01 [1]	20

[1] – Aplicação de pára-raios de LT nas três fases de cada torre das faixas indicadas.

Tabela 5.8 – Resistência de aterramento – Adequação Trecho – 3 (Torre 115 à Torre 171).

Faixa	Resistência média (Ω)	Porcentagem de torres no trecho (%)
0-20 Ω	17	12
20-25 Ω	23	2
25-35 Ω	30	19
35-40 Ω	37	14
40-45 Ω	43	7
45-50 Ω	0,01 [1]	7
50-65 Ω	0,01 [1]	5
65-100 Ω	0,01 [1]	19
100-acima Ω	0,01 [1]	15

[1] – Aplicação de pára-raios de LT nas três fases de cada torre das faixas indicadas.

A partir da aplicação de pára-raios nas torres pertencentes às faixas indicadas nas Tabelas 5.6, 5.7 e 5.8, cuja resistência de aterramento é de 0,01 Ω A, foram feitas novas estimativas de desempenho para os trechos 1, 2 e 3,.

Pode-se observar que, a presença dos pára-raios representou uma melhoria significativa no desempenho da LT. Verifica-se uma redução do número de desligamentos para os trechos 1, 2 e 3 de 70 %, 85% e 82%, respectivamente. Considerando os três trechos verifica-se um número médio de desligamentos de 2,07 desligamentos por 100 km por ano, uma redução da ordem de 78% em relação à configuração original sem pára-raios.

Tabela 5.9 - Desligamentos por Backflashover – Adequação Trechos 1, 2 e 3

Trecho	N_g (desc./km ² /ano)	Nº de desligamentos/100km/ano
1	8,1	2,17
2		1,94
3		2,11
Média		2,07

As faixas de resistência de aterramento indicadas nas Tabelas 5.6, 5.7 e 5.8, equivalem a 76 torres da LT sob análise.

Apresenta-se, na Tabela 5.10, a relação das torres onde foi admitida a instalação de pára-raios nas três fases, totalizando 228 Pára-raios.

Tabela 5.10 – Torres indicadas para instalação de pára-raios ZnO.

Nº das torres a serem instaladas pára-raios ZnO nas três fases				
Trecho 1	Trecho 2		Trecho 3	
3	60	100	115	146
9	61	105	116	153
17	62	106	117	155
19	66	107	119	156
23	67	108	121	157
24	68	112	123	158
25	69	-	124	159
27	70	-	126	160
28	71	-	127	161
29	72	-	128	163
30	75	-	132	165
36	76	-	134	166
38	79	-	136	167
39	88	-	137	-
40	89	-	139	-
42	90	-	140	-
43	93	-	141	-
44	96	-	144	-
45	98	-	145	-

A partir dos resultados pode-se observar que a instalação de pára-raios pode melhorar e muito o desempenho de uma LT frente às descargas atmosféricas, mesmo para uma configuração onde não sejam aplicados pára-raios em todas as torres.

Na simulação efetuada a seguir, será utilizado o programa PSCAD, para a verificação dos valores máximos de energia a serem dissipadas nos pára-raios, utilizando-se a modelagem apresentada no Capítulo 3.

5.4 AVALIAÇÃO DA MAGNITUDE DAS ENERGIAS A SEREM DISSIPADAS NOS PÁRA-RAIOS

A partir da análise do desempenho da LT de 230 kV apresentada no item 5.3, foi efetuado um levantamento da dos valores da energia a ser dissipada nos pára-raios para descargas atmosféricas atingindo o topo da torre, para dois casos distintos a saber:

Caso 1: Aplicação de pára-raios em todas as torres;

Caso 2: Aplicação de pára-raios somente nas torres indicadas na Tabela 5.10.

Para a simulação da LT no programa PSCAD, foi necessário o calculo da impedância de surto da torre [1], em conformidade com o descrito no item 3.2, Figura 3.2 classe 3.

- Altura da torre - h: 22,5m;

- raio da seção média da torre - r = 0,80 m;

⇒ Impedância de surto da torre - $Z_t = 202,6 \Omega$

5.4.1 Avaliação da energia nos pára-raios

Para a avaliação do esforço exigido nos pára-raios, foram tomados como base os parâmetros de um pára-raios da ABB [38] cujas características básicas são apresentadas a seguir:

$V_n = 192 \text{ kV}$;

Capacidade de absorção de energia = 5,1 kJ/kV;

Corrente de descarga nominal = 10 kA;

Em conformidade como o apresentado no item 2.3, a máxima capacidade de absorção de energia deste pára-raios é de $192 \text{ kV} \times 5,1 \text{ kJ/kV} = 979 \text{ kJ}$.

5.4.1.1 Caso 1 – Aplicação de pára-raios nas três fases de todas as torres

Apresentam-se, na Tabela 5.11, os valores de energia a ser dissipada pelos pára-raios, para a LT avaliada no item 5.3, considerando a aplicação de pára-raios em todas as cadeias de isoladores. Os resultados contemplam a máxima energia a ser dissipada pelos pára-raios para uma descarga de 200 kA de pico e rampa $2,0 \times 50\mu\text{s}$, simulada no topo de cada torre. Em conformidade com o item 2.2, o valor de pico da descarga simulada foi de 200 kA, admitindo-se que este seja o valor máximo que o valor de pico de uma descarga atmosférica possa atingir, tendo em vista que a probabilidade deste valor ser excedido é de 0,77%.

Os valores descritos na Tabela 5.11 foram obtidos a partir das simulações no PSCAD, onde foi verificada a energia dissipada em todos os pára-raios da LT. Para cada torre, foi tomado o maior valor de energia dissipada por pára-raios, no caso os pára-raios das fases A e C, apresentaram valores idênticos e maiores que os verificados para os pára-raios da fase B. Isto se deve à maior distância das fases A e B do cabo guarda, o que está de acordo com os resultados obtidos na análise de sensibilidade do item 4.2.2.

Em conformidade com o item 4.2.2, pode-se observar que os maiores valores de energia apresentados estão associados à maior resistência de aterramento da torre. Porém são encontradas algumas diferenças. Por exemplo, a torre n° 33 apresenta resistência de aterramento igual a $39,79\Omega$ a energia máxima dissipada foi de 28,53 kJ. Por outro lado a torre n° 46 apresenta resistência de aterramento $15,51\Omega$ e máxima energia dissipada pelos pára-raios foi de 38,87kJ. Era de se esperar que, uma resistência de aterramento menor levasse a uma energia a ser dissipada menor. Porém, devem ser observadas as resistências de aterramento das torres adjacentes próximas à torre atingida: no caso da torre 46, a resistência de aterramento das duas primeiras torres adjacentes são bem mais elevadas se comparadas com as resistências de aterramento das torres adjacentes à torre 33. Sendo assim a redução na

sobretensão que se estabelece na torre no momento da descarga é menos eficiente para a torre 46.

Esta é uma boa razão para que seja feito o levantamento da máxima energia a ser dissipada pelos pára-raios torre a torre, tendo em vista que a resistência de aterramento das torres é totalmente dependente das características do solo que varia ao longo de qualquer trajeto.

Tabela 5.11: Máxima energia dissipada no pára-raios de cada torre – Caso 1.

Nº torre	R _{at} (Ω)	E(kJ)	Nº torre	R _{at} (Ω)	E(kJ)	Nº torre	R _{at} (Ω)	E(kJ)
1	17,98	73,59	39	129,38	293,65	77	27,25	146,62
2	16,41	44,31	40	56,87	218,05	78	15,51	65,17
3	70,05	217,86	41	41,98	163,07	79	96,44	205,22
4	45,42	192,52	42	83,44	255,27	80	41,79	166,84
5	34,69	153,50	43	73,37	265,61	81	16,17	50,00
6	36,72	152,91	44	64,12	255,51	82	36,90	150,66
7	30,09	123,71	45	102,80	259,01	83	41,56	172,90
8	21,70	87,90	46	15,51	38,87	84	32,07	134,45
9	84,48	233,15	47	18,07	55,06	85	28,21	110,40
10	20,69	66,57	48	33,27	135,95	86	44,82	145,65
11	21,39	97,96	49	28,62	125,77	87	29,20	110,31
12	19,35	88,23	50	31,88	136,23	88	205,05	334,26
13	16,95	46,37	51	22,90	92,05	89	125,21	335,43
14	17,38	53,57	52	18,53	64,26	90	72,51	265,50
15	16,92	55,61	53	19,54	67,56	91	42,13	139,48
16	47,79	188,90	54	18,14	53,27	92	22,18	78,88
17	54,03	214,67	55	16,76	68,50	93	56,99	194,90
18	40,83	185,65	56	15,46	58,65	94	33,59	148,86
19	65,65	220,32	57	35,91	126,75	95	37,4	165,30
20	27,39	108,44	58	34,23	132,55	96	73,24	221,14
21	38,12	123,43	59	22,91	90,38	97	15,66	47,21
22	24,18	119,82	60	56,22	220,57	98	82,6	224,83
23	69,59	235,57	61	87,30	303,93	99	23,82	130,31
24	69,84	257,93	62	293,50	357,22	100	218,98	287,65
25	86,04	247,31	63	46,31	191,92	101	20,76	72,83
26	22,14	81,95	64	16,34	41,67	102	15,28	38,50
27	71,48	227,69	65	39,18	125,63	103	23,96	88,45
28	71,16	253,16	66	93,37	265,88	104	11,16	23,56
29	61,50	240,90	67	68,15	249,55	105	441,26	352,01
30	58,09	222,0	68	74,04	246,12	106	157,41	394,77
31	39,79	151,17	69	53,02	230,68	107	194,61	396,59
32	23,83	72,95	70	118,47	313,41	108	119,13	315,54
33	26,41	28,53	71	118,04	326,67	109	22,54	75,42
34	20,13	83,38	72	110,21	279,23	110	15,66	53,31
35	26,07	85,81	73	18,24	64,10	111	21,29	101,06
36	50,30	192,54	74	20,00	68,62	112	72,06	226,60
37	49,17	195,90	75	53,89	203,42	113	48,86	174,16
38	52,67	222,40	76	52,01	205,98	114	34,38	161,30

Tabela 5.11: Máxima energia dissipada no pára-raios de cada torre – Caso 1.

Nº torre	R _{at} (Ω)	E(kJ)	Nº torre	R _{at} (Ω)	E(kJ)	Nº torre	R _{at} (Ω)	E(kJ)
115	224,24	341,26	134	143,72	267,75	153	47,81	180,44
116	150,37	343,07	135	39,74	180,20	154	35,61	193,98
117	80,19	258,15	136	83,2	268,99	155	68,7	254,16
118	26,72	111,84	137	93,12	253,47	156	249,79	372,24
119	156,2	273,02	138	18,95	74,03	157	167,93	355,99
120	35,88	117,32	139	53,58	200,77	158	73,67	284,42
121	66,37	206,28	140	75,57	252,70	159	80,34	266,32
122	15,23	61,45	141	51,71	196,20	160	97,56	267,11
123	235,81	287,10	142	16,72	42,26	161	46,18	174,22
124	49,24	208,06	143	34,64	170,03	162	22,88	86,66
125	43,89	199,35	144	297,97	335,05	163	137	265,63
126	183,27	317,11	145	51,06	242,96	164	44,58	146,00
127	63,72	263,97	146	76,13	195,26	165	45,38	205,78
128	89,07	258,25	147	15,86	44,74	166	121,03	299,63
129	38,76	160,53	148	32,17	129,91	167	74,11	256,88
130	32,8	115,59	149	39,36	167,15	168	27,25	113,81
131	25,11	74,95	150	36,72	150,30	169	11,27	19,93
132	53,08	183,18	151	17,9	59,30	170	38,09	126,84
133	16,31	69,37	152	39,74	145,16	171	30,84	174,10

5.4.1.2 Caso 2 – Aplicação de pára-raios somente em torres específicas.

Apresentam-se na Tabela 5.12 os resultados da simulação da LT, considerando a aplicação de pára-raios nas três cadeias de isoladores apenas nas torres indicadas na Tabela 5.10. Assim como antes os resultados contemplam a máxima energia dissipada pelos pára-raios para uma descarga de 200 kA de pico e rampa 2,0 x 50µs, simulada no topo de cada torre.

Os valores descritos na Tabela 5.12, foram obtidos através de simulações no PSCAD tomando-se o valor máximo de energia a ser dissipada por pára-raios. Os resultados obtidos estão em conformidade com a análise de sensibilidade, presente no item 4.2.2, onde torres com valores de resistência de aterramento mais baixo apresentaram valores mais baixos de energia. Porém, neste caso foram obtidos resultados interessantes.

A instalação de pára-raios em uma torre seguiu as conclusões constantes no item 5.3. Com isso, na configuração final da LT, tem-se torres cujas torres adjacentes possuem pára-raios e torres cujas torres adjacentes não possuem pára-raios.

Pode-se observar que a energia a ser dissipada no pára-raios depende não apenas da resistência de aterramento das torres onde esse é instalado, mas principalmente da existência de pára-raios nas torres adjacentes. É o que ocorre, por exemplo, com as diferenças verificadas entre as torres 25 e 79. A torre 25 contém torres adjacentes com pára-raios, ao passo que para a torre 79, somente após 3 torres adjacentes haverá uma torre com pára-raios .

Estes resultados estão em conformidade com a análise de sensibilidade do item 4.2.2.2, onde foi apresentada a influência de torres adjacentes com pára-raios nos valores de energia a ser dissipada pelos pára-raios.

Tabela 5.12: Máxima energia dissipada no pára-raios de cada torre – Caso 2.

Nº torre	R _{at} (Ω)	E(kJ)	Nº torre	R _{at} (Ω)	E(kJ)	Nº torre	R _{at} (Ω)	E(kJ)
3	70	70,49	70	118	294,29	127	64	218,92
9	85	74,19	71	118	288,89	128	89	205,13
17	54	98,01	72	110	214,91	132	53	122,51
19	66	173,16	75	54	146,11	134	144	205,32
23	70	174,78	76	52	151,61	136	83	212,78
24	70	223,51	79	96	102,42	137	93	201,59
25	86	198,53	88	205	161,94	139	54	164,01
27	71	196,80	89	125	216,81	140	76	218,21
28	71	219,07	90	72	189,26	141	52	151,89
29	62	214,38	93	57	137,15	144	298	254,97
30	58	195,78	96	73	160,09	145	51	152,33
36	50	93,67	98	83	155,20	146	76	107,44
38	53	187,78	100	219	178,52	153	48	88,73
39	129	204,69	105	441	194,71	155	69	214,47
40	57	204,68	106	157	263,81	156	250	351,60
42	83	232,54	107	195	287,06	157	168	350,39
43	73	225,70	108	119	205,90	158	74	276,0
44	64	173,53	112	72	141,64	159	80	126,78
45	103	123,57	115	224	303,04	160	97	253,85
60	56	85,64	116	150	328,43	161	46	152,95
61	87	195,44	117	80	227,38	163	137	223,12
62	293	253,04	119	15	223,24	165	45	160,22
66	93	202,35	121	66	157,69	166	121	273,75
67	68	213,75	123	236	241,84	167	74	124,61
68	74	216,55	124	49	181,64			
69	53	205,36	126	183	269,63			

5.4.1.3 Comparação dos resultados Caso 1 x Caso 2.

As Figuras 5.5 a 5.7 apresentam os valores de energia dissipada pelos pára-raios, instalados nas torres indicadas no Caso 2 comparado aos resultados obtidos para as mesmas torres no Caso 1.

A partir das Figuras 5.5 a 5.7, é possível constatar que o caso 1 apresenta os maiores valores de energia a serem dissipadas pelos pára-raios para toda a LT. Além disso, outro fator importante a ser observado é que todos os valores obtidos ficaram bem abaixo da máxima capacidade de absorção de energia dos pára-raios sob análise, que é de 979 kJ.

Para o caso 1, o maior valor de energia dissipada por um pára-raios foi de 396,59 kJ que ocorreu na torre de número 107. Para este caso a especificação de um de pára-raios com capacidade de absorção de energia de 2,1 kJ / kV seria suficiente.

Para o caso 2, o maior valor de energia dissipada por um pára-raios foi de 351,60 kJ que ocorreu na da torre 156. Para este caso, a especificação de um pára-raios com capacidade de absorção de energia de 1,8 kJ / kV já seria suficiente.

Cabe lembrar que, os resultados foram obtidos para uma descarga atmosférica de amplitude considerável (200kA), e mesmo assim as torres apresentaram valores de energia a serem dissipadas bem reduzidas. Para muitas torres avaliadas, um pára-raios de 192kV com capacidade de absorção de energia de 0,5kJ/kV seria mais que suficiente.

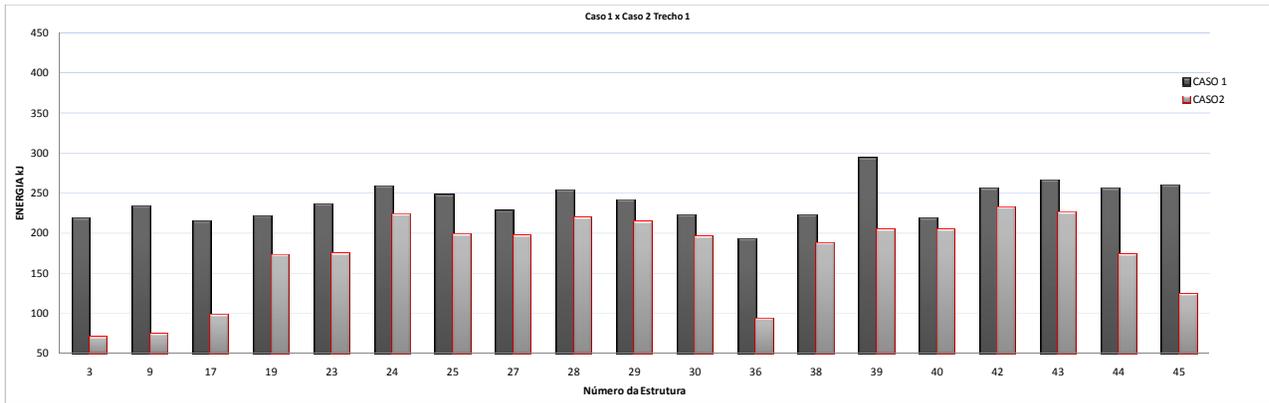


Figura 5.5: Máxima energia dissipada pelos pára-raios – Caso 1 x Caso 2 – Trecho 1.

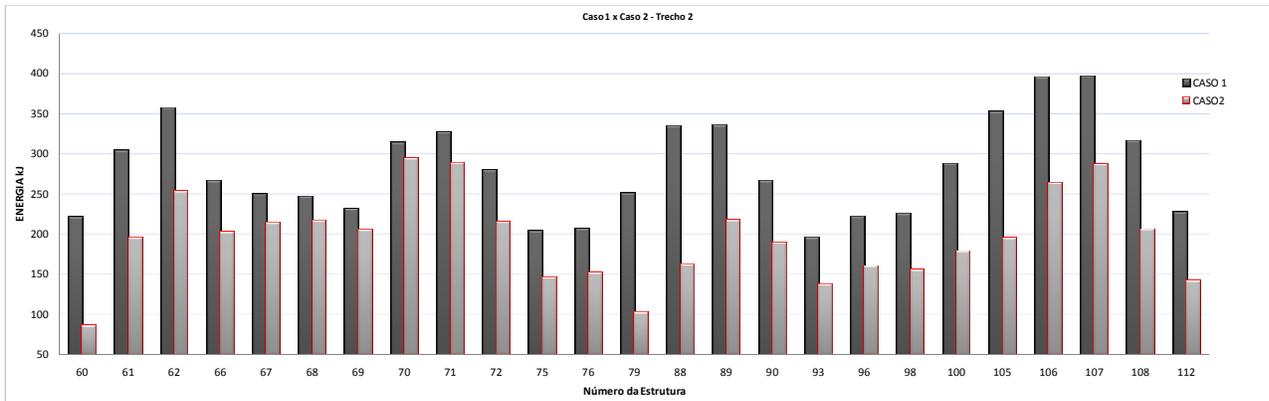


Figura 5.6: Máxima energia dissipada pelos pára-raios - Caso 1 x Caso 2 – Trecho 2.

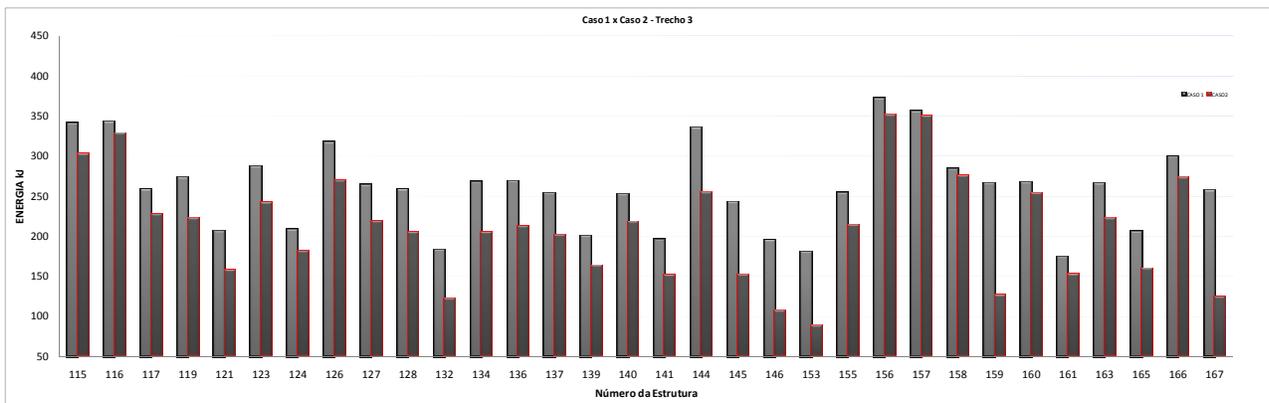


Figura 5.7: Máxima energia dissipada pelos pára-raios – Caso 1 x Caso 2 – Trecho 3.

5.4.1.4 Análise de descargas subseqüentes.

Conforme a análise dos resultados apresentada no item 4.4.1.3, o Caso 1 apresentou o maior valor de energia a ser dissipado por um pára-raios na LT simulada. Sendo assim, o caso 2, que contempla a instalação de pára-raios em algumas torres, não foi simulado tendo em vista que apresentaria valores de energia menores aos obtidos a seguir.

O valor máximo de energia a ser dissipada ocorreu para a torre n° 107 que apresentou uma energia de 369,59kJ.

Para esta torre em especial, foi feita uma verificação da energia a ser dissipada pelos pára-raios considerando a mesma descarga atmosférica modelada nos itens 5.4.1.1 e 5.4.1.2, porém com a inclusão de 3 descargas subseqüentes com intensidade igual a 40% da primeira descarga e tempos de frente e de cauda iguais ao da primeira descarga. A característica das descargas subseqüentes está em conformidade com o descrito no item 2.2.2.

Este levantamento foi elaborado somente para a torre n° 107, pelo fato de ter apresentado o maior valor de energia a ser dissipado pelos pára-raios. As demais torres, sob as mesmas condições, apresentariam valores inferiores de energia a ser dissipada.

Considerando então as descargas subseqüentes, o valor de energia a ser dissipada pelos pára-raios foi de 562,88 kJ, um aumento de 52% na energia a ser dissipada.

Mesmo nesta condição extrema, o valor de 562,88kJ está abaixo da capacidade máxima de absorção de energia dos pára-raios simulados que é de 979 kJ. De onde se conclui que, para a aplicação de pára-raios nesta suposta LT, mesmo em condições severas que envolvem altos valores de energia a ser dissipada pelos pára-raios, não seria necessária a especificação de equipamentos especiais com capacidade de absorção de energia acima dos que os fabricantes ofertam atualmente. Além disso, os resultados mostram que é possível utilizar pára-raios com capacidade de absorção de energia menores e mais baratos.

5.4.2 Avaliação econômica Caso 1 x Caso 2.

Com estes resultados, foi possível verificar o ganho significativo que se pode ter a partir de uma análise mais detalhada das reais necessidades de uma linha de transmissão para torná-la adequada às condições operacionais.

Para uma análise qualitativa das diferenças de investimento entre as duas alternativas, em consulta a um fabricante obteve-se o custo unitário de um pára-raios ZnO de 192kV – 4,5kJ/kV igual a R\$7.000. Para o Caso 1, seriam necessários 513 pára-raios, que demandaria um custo de R\$ 3.591.000.

Para o Caso 2, seriam necessários 228 pára-raios a um custo total de R\$ 1.596.000 uma redução de 44%, em comparação com o Caso 1.

Além disto, os resultados obtidos mostraram que um pára-raios ZnO de 192kV – 2,1kJ/kV seria mais que suficiente para a quase totalidade das torres. Com isso, a necessidade de pára-raios com menor capacidade de absorção de energia poderá representar um ganho na redução dos custos.

Só para ilustrar este aspecto, em consulta a um fabricante de pára-raios, foi informado que a diferença do preço de um pára-raios de 288kV, com capacidade de absorção de energia de 7,5kJ/kV em relação a um pára-raios de mesma tensão nominal porém com capacidade de 4,5kJ/kV é da ordem de 45%, um valor bem significativo.

O Capítulo 6 a seguir, apresenta as conclusões e proposições de continuidade dos trabalhos.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

A melhoria do desempenho de linhas de transmissão através de aplicação de pára-raios ZnO é uma medida interessante e, com a evolução tecnológica, tem se caracterizado como uma tendência para os novos projetos de linha de transmissão, tendo em vista que o aumento constante da demanda por energia elétrica e a elevação do seu custo exigem do sistema elétrico um desempenho cada vez melhor.

O principal foco deste trabalho foi investigar a energia absorvida pelos pára-raios ZnO, quando instalados em torres que possuem resistência média de aterramento elevada. Para análise da absorção de energia, foi utilizado o programa de transitórios eletromagnéticos – PSCAD - V4.2.1– Versão Educacional.

Foi estudada uma LT de 230 kV hipotética, cujos valores de resistência de pé de torre foram atribuídos aleatoriamente, e variaram entre 11 e 441 ohms, porém com um valor médio elevado.

O desempenho da LT frente às descargas atmosféricas foi estimado através do programa Flash, disponibilizado pelo IEEE. A partir do programa Flash, foi possível investigar/estimar o desempenho da LT e buscar formas de se melhorar o desempenho da mesma. Foram feitas diversas simulações em que variou-se a localização dos pára-raios até se obter o desempenho desejável.

A configuração de aplicação de pára-raios em torres específicas atendeu ao desempenho esperado de 2 desligamentos / 100km/ano, exigido pelos procedimentos de rede do ONS [30].

Foram calculados os valores das energias máximas dissipadas pelos pára-raios em cada torre cujos resultados serviram de base para as conclusões aqui apresentadas.

Uma vez que as simulações no programa Flash demonstraram a eficiência da blindagem dos cabos-guarda contra descargas diretas na fase, o trabalho não avaliou os valores de energia devidos às falhas de blindagem, não sendo esperadas descargas atmosféricas diretas nas fases com capacidade de provocarem desligamentos e, portanto, impor altos valores de energia a ser dissipada pelos pára-raios.

Os casos avaliados demonstraram o bom resultado da instalação de pára-raios em algumas torres da LT, obtendo assim uma redução dos custos visando um desempenho desejável.

Os resultados mostraram que, para descargas no topo de uma dada torre, o aumento do número de torres com pára-raios adjacentes à torre atingida, eleva a energia a ser dissipada pelo pára-raios da torre atingida. Isto se deve às reflexões das ondas de corrente que se estabelecem no sistema. Desta forma, pára-raios ZnO instalados em pontos específicos de linhas de transmissão dissiparão menos energia do que quando instalados em todas as torres.

O fato de a máxima energia a ser dissipada por um pára-raios ser menor nestas condições indica, nestes casos, a possibilidade da especificação de pára-raios com menor capacidade de absorção de energia.

A possibilidade de utilizar-se um número menor de pára-raios na LT com menor capacidade de absorção de energia possibilita uma redução nos custos de implantação dos pára-raios, fator importante para viabilização da implantação desta solução.

Os resultados obtidos no presente trabalho permitem afirmar que, para linhas onde não seja admissível desligamentos associados às descargas atmosféricas, a implantação de pára-raios em certos pontos da linha pode provavelmente se caracterizar como a melhor alternativa sob aspectos técnicos e econômicos.

Os resultados do estudo mostram também que os pára-raios de linhas de transmissão de 230kV atualmente comercializados atendem à capacidade de absorção de energia máxima exigida. De fato, estes pára-raios apresentam, inclusive, uma folga significativa com relação à suas capacidades nominais de absorção de energia frente a surtos atmosféricos.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Como propostas de continuidade do presente trabalho, seria importante a melhoria do modelo da LT proposto, através da inclusão do efeito de ionização do solo, na resistência de aterramento da torres. Com isso, pode-se obter menores valores de energia a serem dissipadas, para descargas no topo da torre.

Nas simulações do presente trabalho, os parâmetros da descarga atmosférica foram selecionados de maneira determinística. Propõe-se que sejam incluídos os aspectos probabilísticos associados às descargas atmosféricas. Com isso, será possível substituir o uso do programa Flash para a obtenção do desempenho mais realista da LT, agregando uma maior confiabilidade aos resultados do trabalho. Além disso, será possível fazer um levantamento do valor de energia a ser dissipada anualmente por cada pára-raios, permitindo a elaboração do cálculo da vida útil esperada de cada pára-raios.

Com os resultados obtidos sobre a vida útil dos pára-raios, seria possível implementar um esquema de manutenção preditiva extremamente interessante.

Uma linha de pesquisa que pode ser seguida é a de avaliar a viabilidade da construção de pára-raios com menor capacidade de absorção de energia a custo reduzido em relação aos equipamentos disponíveis no mercado. Tal investigação tem potencial para se tornar um trabalho de grande repercussão, pois está diretamente associado a redução nos custos dos pára-raios de LT.

Outro assunto de interesse a ser investigado é a extensão da análise do comportamento de pára-raios com capacidade de absorção de energia reduzida quando da ocorrência de sobretensões de manobra e temporárias no sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] General Electric Company and Electric Power Research Institute, "Transmission Line Reference Book, 345kV and Above," Electric Power Research Institute, Palo Alto, California 1982.
- [2] Luiz Cera Zanetta junior, Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência, EDUSP, 2003.
- [3] A.R. Hileman, Insulation Coordination for Power Systems, Marcel Dekker, 1999.
- [4] Eva J. Tarasiewicz, Finn Rimmer, Atef S. Morched "Transmission line arrester energy, cost, and risk of failure analysis for partially shielded transmission lines" IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 15 No.3 July 2000.
- [5] Tomohiro Hayashi, Yukio Mizuno, Katsuhiko Naito "Study on Transmission-Line Arresters for Tower With High Footing Resistance" IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 23 No.4 October 2008.-
- [6] R.Dan Melchior, "Fault testing of gapless zinc oxide transmission line arresters under simulated field conditions,"IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 10 No.2 April 2003.
- [7] Luiz C. Zanetta jr, Carlos Eduardo de Moraes, Fernando A. Moreira "Aspectos metodológicos para estudo de aplicação de pára-raios em Linhas de transmissão" XV SNPTEE, GSI/15 - 17 a 22 de outubro de 1999 - Foz do Iguaçu - Paraná - Brasil.
- [8] Luiz C. L. Cherchiglia, Ana Cristina G. Bezerra, Angélica da Costa O. Rocha, Vander J. de Souza, "Estudos para aplicação de pára-raios de ZnO em linhas de transmissão da CEMIG", XV SNPTEE, GSI/13 - 17 a 22 de outubro de 1999 - Foz do Iguaçu - Paraná - Brasil.
- [9] Jorge L. de Franco, Marcos Vinícius Wendler, Evilasio A. Lira "Melhoria do desempenho de linhas de transmissão através de aplicação de pára-raios", XV SNPTEE, GSI/11 - 17 a 22 de outubro de 1999 - Foz do Iguaçu - Paraná - Brasil.
- [10] Ana Cristina G. Bezerra, "Diagnóstico de desempenho sob ação de descargas atmosféricas de LT em projeto com aplicação de pára-raios de ZnO", XV SNPTEE, GSI/10 - 17 a 22 de outubro de 1999 - Foz do Iguaçu - Paraná - Brasil.
- [11] L.A. Kraft "Modelling Lightning performance of transmission systems using PSpice" IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 6 No.2 May 1991.
- [12] Hernandez-Corona, R. Regalado-Contreras, G "Performance of 230 kV transmission lines applying externally gapped type arresters" IEEE Trans. And distribution conference and exposition, 2001 IEEE/PES, Vol. 1 No.2 Feb 2001.

- [13] Shuji Furukawa, Osamu Usuda, Takashi Osozaki, Takashi Irie “Development and application of lightning arresters for transmission lines” IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 4 No.4 October 1989.
- [14] Luiz C. L. Cherchiglia, Carlos Eduardo de Morais Pereira, “Application studies of line arresters in partially shielded 138 kV transmission lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, n° 1, January 2003.
- [15] L. Stenstrom, J. Lundquist, “Selection, dimensioning and testing of line arresters”, CIGRE International workshop on Line surge arresters and lightning, Rio de Janeiro – Brazil – April 24 / 26 1996.
- [16] Luiz C. Zanetta jr, “Evaluation of Line Surge Arrester Failure Rate for Multipulse Lightning Stresses”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, n° 3, July 2003.
- [17] John Wiliamson, “Lightning Protection and Surge Arrester Application on NB Power Transmission Lines”, NB Power Transmission Corporation Canada 2008 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Chicago.
- [18] J.A Martines, “Modeling Overhead Transmission Lines For Line Arresters Studies”, IEEE PES 2004, Vol. 1, PP 1125-1130.
- [19] Oscar Kastruo Filho, Armando Nigri, Paulo maldonado, Francisco M. S. Carvalho, Luiz Claudio R. G, Luiz C. Zanetta Jr, Fernando A. M. Manuel Luiz B. M, Weid Sato, Dalton Oliveira C. do Brasil, “Aplicação de Pára-raios ZnO em Linhas de 138 kV”, XIV SNPTEE, GSI/22 - 1997 – Belém - PA – Brasil.
- [20] Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society, “IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines” IEEE Std 1243-1997.
- [21] International Electrotechnical Commission - IEC , “International Standard” CEI – IEC-99-5 – First edition 1996-02.
- [22] J.A Martines, “Lightning Performance Analysis of Overhead Transmission Lines Using the EMTP”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 20, n° 3, July 2005.
- [23] J.A Martines, Ferley Castro “Tower Modeling for Lightning Analysis of Overhead Transmission Lines”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005, ISBN 0-7803-9157-8.
- [24] L. Stenström, J. Lundquist “Energy Stress on Transmission Line Arresters Considering the Total Lightning Charge Distribution”, IEEE Transmission and Distribution Conference, 1996, Pages 302-306.
- [25] J.A Martines, Ferley Castro “Lightning Flashover Rate of an Overhead Transmission Line Protected by Surge Arresters”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007, 10.1109/PES.2007.385543.

- [26] Jin-Liang He, Rong Zeng, Jun Hu, Shui-Ming Chen, Jie Zhao “Design and Application of Line Surge Arresters to Improve Lightning Protection Characteristics of Transmission Lines”, IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008, Pages 1-8, 10.1109/TDC.2008.4517216.
- [27] WWW. inpe.br./webelat/homepage.
- [28] K.G.Ringler Peter Kirby, C.C. Erven, M.V.Lat, T.A.Malkiewicz, “The Energy Absorption Capability and Time to Failure of Varistors Used in Station Class Metal Oxide Surge Arresters”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, n° 1, January 1997.
- [29] Estácio T. W. Neto. “Monitoramento e Diagnóstico de Pára-raios a ZnO Através de Redes Neurais Artificiais”. 2007. 115 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2007.
- [30] Procedimentos de Rede do ONS – Sub-Módulo 2.4.
- [31] IEEE Working Group 3.4.11 – Application of Surge Protective Devices Subcommittee – Surge Protective Device Committee “Modeling of Metal Oxide Surge Arrester”, IEEE transaction on Power delivery, vol 7 n° 1, january 1992.
- [32] A. Goudarzi, H. Mohseni “Evaluation of Mathematical Models of Metal Oxide Surge Arrester for Energy Absorption Study”, Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004. 39th International, pages 211 – 214, vol.1, 1-86043-365-0.
- [33] Rémi Lambert, Eva J. Tarasiewicz, Alain Xémard, Gérard Fleury, “Probabilistic Evaluation of Lightning-Related Failure Rate of Power System Apparatus” IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 18 No.2 April 2003.
- [34] Masaru Ishii, Elichi Ohsaki, Tatsuo Kawamura, Kaneoshi Murotani, Teruya Kouno, Takemitsu Higuchi, “Multistory Transmission Tower Model Lightning Surge Analysis” IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 6 No.3 July 1991.
- [35] Milian S. Savic, “Estimation of the Surge Arrester Outage Rate Caused by Lighting Overvoltages” IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 20 No.1 January 2005.
- [36] P.Pinceti, M. Giannettoni “Simplified model for zinc oxide surge arresters” IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 14 No.2 April 1999.
- [37] Antônio E. A. Araújo, Washington L. A. Neves, “Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia”, Editora UFMG, 2005.
- [38] Catálogo eletrônico ABB – Pára-raios de Óxido de Zinco PEXLIM R – www.abb.com.br.
- [39] Matsuoka, M.: “Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics”. Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 10, N° 6, June 1971.