

## **VI. Descargas atmosféricas em linhas de transmissão**

Descargas atmosféricas são a principal causa de desligamentos não programados verificados no sistema elétrico brasileiro, sendo responsáveis por aproximadamente 65% dos desligamentos ocorridos em linhas de transmissão com tensões nominais até 230 kV. Tais índices podem ser mais críticos em regiões de altas atividades cerâmicas e elevados valores de resistividade do solo.

São apresentadas neste capítulo informações referentes aos aspectos e parâmetros a serem considerados no estudo de desempenho das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, bem como efeito da incidência de descargas atmosféricas sobre linhas de transmissão com e sem cabos pára-raios.

Apesar deste Capítulo estar direcionado a aplicação de pára-raios em linhas de transmissão, os conceitos aqui apresentados também são válidos para a análise de desempenho de redes elétricas de distribuição.

### **VI.1 Aspectos a serem considerados no estudo da incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão**

#### **VI.1.1 Características das descargas e frequência de ocorrência**

Fenômenos de danosas conseqüências, as descargas atmosféricas resultam do acúmulo de cargas elétricas nas nuvens e a conseqüente descarga sobre o solo terrestre ou sobre qualquer estrutura que ofereça condições favoráveis à descarga. A descarga atmosférica é um fenômeno complexo, podendo existir em uma descarga várias ramificações e vários pontos de contato com a terra.

Em linhas gerais, uma descarga atmosférica pode ser definida como uma descarga elétrica transitória de curta duração e com uma elevada corrente associada, que usualmente atinge quilômetros de extensão. Tal descarga ocorre quando nuvens em uma região da atmosfera atingem uma quantidade suficiente de cargas elétricas para dar origem a campos elétricos cuja intensidade supere a rigidez dielétrica do ar, causando assim a ruptura do meio (ar). Para que tal processo possa acontecer é necessário que as condições ambientais sejam favoráveis, situação que pode ser encontrada no interior de grandes tempestades de neve e de areia, nas nuvens sobre vulcões em erupção e, na maior parte das vezes, na nuvem de tempestade (cúmulo-nimbus) /1/.

Com relação às descargas originadas nas nuvens de tempestade, quatro tipos de descargas podem ser identificados: descargas dentro da nuvem (intranuvem), descargas entre nuvens, descargas entre nuvem e solo e entre nuvem e estratosfera. Dentre os tipos de descargas existentes, a de interesse para análise de desempenho dos sistemas elétricos corresponde as descargas entre nuvem e solo, as quais podem ser classificadas como:

- Descargas ascendentes e descendentes, segundo a direção da evolução do canal que faz o fechamento do percurso ionizado.
- Descargas positivas e negativas, segundo a polaridade da carga na região da nuvem conectada ao solo por esse percurso.

De uma maneira geral, em regiões planas é mais freqüente a ocorrência de descargas negativas e descendentes. Descargas ascendentes são menos freqüentes, e ocorrem geralmente a partir de estruturas elevadas (principalmente quando situadas no topo de regiões montanhosas), como torres de telecomunicações, edificações, mastros entre outras.

Estudos realizados pelo CIGRÉ e observações efetuadas em várias estações de pesquisas atmosféricas em todo o mundo, mostraram que aproximadamente 80% a 90% das descargas descendentes são de polaridade negativa, razão pela qual a maioria das informações disponíveis se refere a esse tipo de descarga.

Registros de 79 descargas atmosféricas realizados pelo "Lightning Research Center" - LRC - em conjunto com a CEMIG na Estação do Cachimbo em Minas Gerais, confirmaram 64 descargas (81%) como sendo de polaridade negativa e 13 descargas (16,5%) positivas. Dentre as 33 descargas descendentes confirmadas através de registros de vídeo, 31 são negativas, correspondendo a 93,9% das descargas descendentes. Dessas, 15 descargas apresentaram somente uma única descarga de retorno (48,4%), enquanto que 16 descargas (51,6%) apresentaram descargas de retorno subseqüentes (descargas atmosféricas múltiplas) com um número médio de 5,8 descargas de retorno por descarga atmosférica /2, 3/. Maiores informações referentes às estatísticas das descargas atmosféricas no Morro do Cachimbo e em outras estações podem ser obtidas em /2/.

Todas as estruturas existentes sob ou sobre o solo estão submetidas aos efeitos das descargas descendentes (nuvem-terra). A necessidade e o tipo de proteção de um sistema dependem da maior ou menor probabilidade desse sistema ser atingido pelas descargas diretas ou pelos efeitos das descargas em suas proximidades (sobretensões induzidas - críticas para sistemas com tensões nominais até 44 kV). A probabilidade de incidência de descargas apresenta uma relação direta com a freqüência com que as descargas ocorrem por unidade de área, em um determinado local ou região. Daí a necessidade de se conhecer a densidade de descargas à terra. Assim, a incidência de descargas atmosféricas sobre uma região pode ser caracterizada pela densidade de descargas à terra, expressa em termos do número de descargas atmosféricas para a terra por quilômetro quadrado ao ano.

Para a determinação da densidade de descargas à terra há a necessidade da utilização de sistemas específicos para a captação das descargas, tais como Sistemas de Localização de Tempestades, redes de contadores de descargas atmosféricas, entre outros.

Atualmente, várias técnicas têm sido amplamente utilizadas para localização das descargas atmosféricas, as quais podem ser classificadas em dois grupos:

um primeiro grupo emprega medições remotas de campos elétrico e magnético e um segundo grupo utiliza detectores ópticos /4/.

Sistemas do tipo LLP ("Lightning Location and Protection System"), LPATS ("Lightning Positioning and Tracking System") e um terceiro sistema, denominado IMPACT ("Improved Accuracy from Combined Technology") que utiliza a combinação dos dois primeiros, estão incluídos no primeiro grupo. O sistema IMPACT vem sendo largamente utilizado em todo o mundo, inclusive no Brasil.

Tais sistemas fornecem informações da localização da descarga atmosférica, da amplitude e polaridade da corrente de descarga, do instante de ocorrência, da diferenciação entre descargas nuvem-solo e outros tipos de descargas, dentre outros parâmetros associados, possibilitando um melhor conhecimento dos parâmetros característicos das descargas. Mais informações sobre os aspectos básicos dos Sistemas de Localização de Tempestades podem ser obtidas a partir da referência /4/.

A Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG e o Sistema Meteorológico do Paraná – SIMEPAR possuem sistemas com tecnologia LPATS e IMPACT. Recentemente, com o sistema instalado por FURNAS Centrais Elétricas S.A. - tecnologia IMPACT e LPATS, tornou-se possível a interligação desses três sistemas, constituindo a Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas (RIDAT) no Brasil /4/. A interligação dos sistemas permite um melhor índice de detecção das descargas, maior precisão na localização e, principalmente, uma ampliação da área de cobertura do sistema, que passou a abranger as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do país.

Apesar do grande avanço tecnológico nas pesquisas sobre descargas atmosféricas verificado no Brasil ao longo dos últimos anos, ainda existe no país uma grande dificuldade na disponibilidade de informações referentes a densidade de descargas à terra, principalmente nas regiões fora da área de cobertura da RIDAT. Nestes casos, são ainda utilizados os dados referentes aos níveis cerânicos, que correspondem ao número de dias de trovada por ano em uma dada região. Embora o nível cerânico não seja o parâmetro mais adequado para a determinação da densidade de descargas à terra, não deixa de ser um indicador do nível de atividade atmosférica, possuindo a vantagem de ser facilmente determinado.

É importante ressaltar, no entanto, que para um dado nível cerânico, a densidade de descargas à terra correspondente pode ser severamente afetada pelo tipo e topografia do terreno. Também deve ser considerado o fato de que em muitos dos casos a determinação do nível cerânico pode conter erros devido a trovadas referentes a descargas atmosféricas entre nuvens, que a rigor não interessam sob o ponto de vista de proteção dos sistemas elétricos.

Uma correlação entre a densidade de descargas à terra ( $N_g$ ) e o nível cerânico ( $N_c$ ), para diferentes condições de terreno, e suas comparações com curvas tradicionalmente utilizadas é apresentada na Tabela VI.1 /2, 5/. Estas informações são apenas para fins informativos.

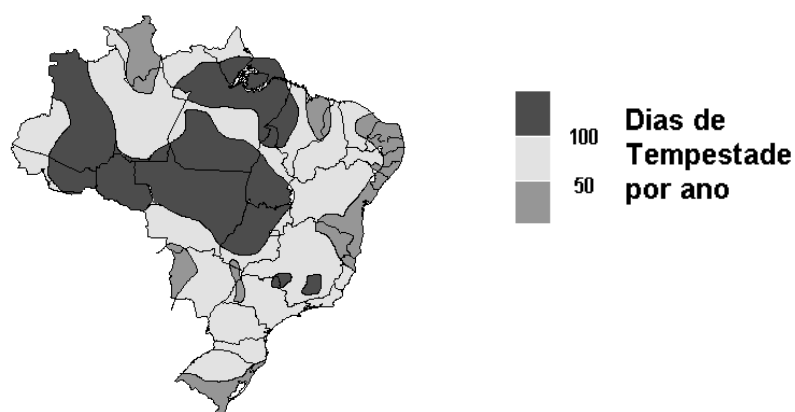
**Tabela VI.1 - Correlação observada entre a densidade de descargas à terra e o nível ceráunico.**

Local	Relação entre DDT e NC	$N_g$ ( $N_c = 60$ ) (*)
África do Sul	$N_g = 0,04 \cdot N_c^{1,25}$	6,7
Minas Gerais	$N_g = 0,028 \cdot N_c^{1,20}$	3,8
México – Região Plana	$N_g = 0,044 \cdot N_c^{1,24}$	7,1
México – Região Costeira	$N_g = 0,026 \cdot N_c^{1,33}$	6,0
México – Região Montanhosa	$N_g = 0,024 \cdot N_c^{1,12}$	2,4
Itália	$N_g = 0,00625 \cdot N_c^{1,55}$	3,6

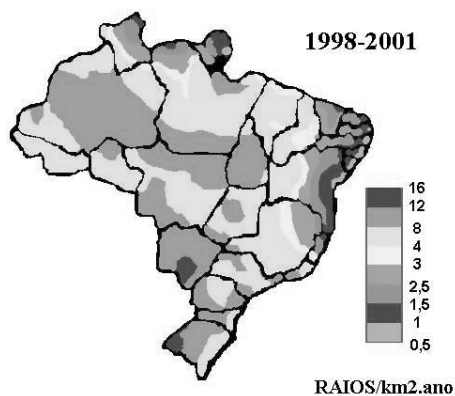
(\*) Valores obtidos para  $N_g$  através da expressão indicada, considerando um nível ceráunico de 60.

No Brasil, utiliza-se geralmente a relação apresentada pelo CIGRÉ.

As Figuras VI.1 e VI.2 mostram os mapas de curvas ceráunicas e de densidade de descargas nuvem-terra para o Brasil, apresentadas pelo INPE /6/.



**Figura VI.1 - Mapa do número de dias com trovoadas por ano no Brasil**



**Figura VI.2 - Mapa de densidade de descargas atmosféricas para a terra (descargas / km² - ano) no Brasil – período de 1998 a 2001**

O mapa de nível ceráunico apresentado na Figura VI.1 foi obtido com base em duas décadas de observação, a partir do início dos anos 60. Com base nas informações apresentadas na figura, pode ser constatado que na maior parte do território brasileiro o número de dias de trovoadas por ano ultrapassa a 50.

O mapa de densidade de descargas nuvem-terra apresentado na Figura VI.2 foi obtido considerando-se uma relação de descargas entre nuvens / descargas nuvem-terra constante e igual a 1,5. As densidades de descargas para o solo foram obtidas comparando-se os dados de satélite que registram todas as descargas com os dados do sistema de detecção de superfície no sudeste e norte do Brasil.

Uma análise dos dados apresentados na Figura VI.2 indica como principal diferença em relação à Figura VI.1 uma maior atividade atmosférica nas regiões Sul e Centro-Oeste do país /6/. Devido ao curto período de observação, ainda é difícil atribuir com relativa precisão uma incerteza aos resultados apresentados na Figura VI.2. Entretanto, essas informações representam a realidade brasileira de uma forma mais adequada que os dados ceráunicos obtidos nas décadas de 60 e 70.

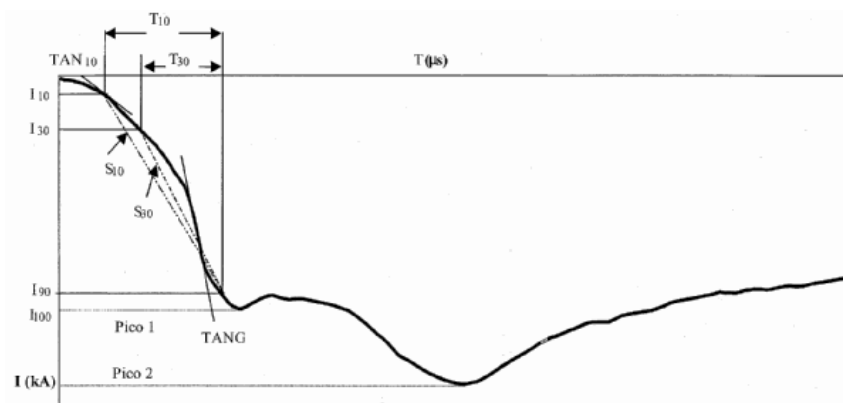
### **VI.1.2 Parâmetros característicos das correntes de descarga**

Para estudos de avaliação de desempenho dos sistemas elétricos devido às descargas atmosféricas, além do número de descargas que podem incidir sobre uma determinada região, torna-se necessário um maior entendimento sobre as características das descargas atmosféricas.

Para a avaliação da suportabilidade da isolamento de equipamentos e componentes de um sistema frente às descargas atmosféricas é necessário conhecer as formas de onda de correntes características das descargas atmosféricas, bem como os parâmetros relacionados às correntes de descarga, tais como a amplitude da corrente de descarga, a taxa de crescimento da corrente, tempo de subida, tempo de meia onda, etc.

Para a obtenção desses parâmetros, estações de medição de descargas atmosféricas foram construídas em diversas partes do mundo. As primeiras medições de corrente de descarga direta foram realizadas no Monte San Salvatore na Suíça. Posteriormente, essas informações foram obtidas em outras partes do mundo: África do Sul, Canadá, Itália, Alemanha, Checoslováquia, Japão e Brasil /2/. Procedimentos para a obtenção das amplitudes das correntes de descarga, através da instalação de elos magnéticos em cabos pára-raios e torres de linhas de transmissão, em torres de igreja, chaminés, entre outras estruturas, também têm sido utilizados /2/.

A necessidade de se avaliar a forma de onda da corrente de descarga, em especial o tempo de frente e a derivada máxima da corrente, de forma a se obter estudos mais consistentes para a proteção dos sistemas elétricos frente às descargas atmosféricas, determinou a introdução de parâmetros adicionais definidos por Anderson e Eriksson /7/, conforme apresentado na Figura VI.3.



**Figura VI.3 - Onda de corrente registrada no Morro do Cachimbo correspondente à primeira corrente de retorno de uma descarga atmosférica negativa descendente /2/**

A Figura VI.3 corresponde a uma forma de onda de corrente real medida na Estação do Morro do Cachimbo em Minas Gerais /2/, com base nos parâmetros característicos definidos e apresentados abaixo:

- Pico da corrente: corresponde ao maior valor de pico da descarga de retorno. De um modo geral, as ondas de corrente relativas às primeiras descargas de retorno apresentam dois picos de corrente, sendo o segundo ( $I_{P2}$ ) geralmente maior do que o primeiro ( $I_{P1}$ ).

Os parâmetros  $T_{10}$ ,  $T_{30}$ ,  $S_{10}$ ,  $S_{30}$  e  $S_m$  são definidos com base em  $I_{P1}$ .  
O parâmetro  $T_{50}$  é definido em função de  $I_{P2}$ .

- $T_{10}$  Intervalo de tempo entre as amplitudes de 10% e 90% em relação ao primeiro pico ( $I_{P1}$ ) da corrente na frente da onda;
- $T_{30}$  Intervalo de tempo entre as amplitudes de 10% e 90% em relação ao primeiro pico ( $I_{P1}$ ) da corrente na frente da onda;
- $T_{d10}$  Tempo de frente equivalente ( $T_{d10} = T_{10} / 0,8$ );
- $T_{d30}$  Tempo de frente equivalente ( $T_{d30} = T_{30} / 0,6$ );
- $T_{50}$  Intervalo de tempo entre o ponto definido pela corrente de 2 kA na frente da onda e o ponto de meia onda relativo ao valor de 50% do pico de corrente (segundo pico);
- $TAN_{10}$  Taxa de crescimento da corrente, correspondente à tangente, na frente da onda, na amplitude de 10%.
- $S_{10}$  Taxa de crescimento médio da corrente entre as amplitudes de 10% e 90% em relação ao primeiro pico ( $I_{P1}$ ) da corrente na frente de onda;
- $S_{30}$  Taxa de crescimento médio da corrente entre as amplitudes de 30% e 90% em relação ao primeiro pico ( $I_{P1}$ ) da corrente na frente de onda;
- $TANG$  (ou  $S_m$ ) Máxima taxa de crescimento da corrente na frente da onda, correspondente ao maior valor  $di/dt$  sobre a frente da onda de uma descarga de retorno.

Diferentes funções para a definição dos parâmetros característicos das descargas atmosféricas têm sido apresentadas em diversas referências, sendo a função distribuição de probabilidade log-normal a mais adotada pela maioria das publicações referentes ao tema para representar a distribuição de probabilidade cumulativa dos picos de corrente medidos e dos demais parâmetros característicos das formas de ondas impulsivas de corrente de descargas atmosféricas /2/.

A equação matemática que descreve a função distribuição de probabilidade log-normal para um determinado parâmetro X (variável aleatória) da onda de corrente é definida por:

$$P(X \leq x) = F_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\ln x}} \cdot \int_0^x \frac{1}{x} \cdot \left[ -\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\ln x - \overline{\ln x}}{\sigma_{\ln x}} \right)^2 \right] \cdot dx$$

Na equação acima,  $F_X(x)$  corresponde a probabilidade da variável aleatória X assumir um valor menor ou igual a um valor específico x;  $\overline{\ln x}$  corresponde ao valor médio do logaritmo neperiano da variável aleatória  $\sigma_{\ln x}$  ao desvio-padrão logarítmico (base e-ln). Desta forma, a distribuição de probabilidade da variável aleatória pode ser totalmente caracterizada por dois parâmetros:  $\overline{\ln x}$  e  $\sigma_{\ln x}$ .

Dentre os parâmetros mais utilizados em estudos de desempenho de sistemas elétricos frente às descargas atmosféricas, as amplitudes das correntes de descarga e a taxa de crescimento das correntes têm sido os mais considerados, visto que esses parâmetros, em especial o primeiro, são fundamentais para a estimativa da probabilidade de desligamentos de linhas de transmissão e de redes de distribuição, bem como para a definição dos critérios a serem utilizados para melhoria de desempenho desses sistemas.

Informações sobre os parâmetros  $\overline{\ln x}$  e  $\sigma_{\ln x}$  das descargas atmosféricas descendentes negativas, para a amplitude máxima da primeira descarga de corrente e da máxima taxa de crescimento da corrente na frente da onda, apresentadas pelo grupo de estudos do CIGRÉ /7, 8/ e obtidas a partir de medições realizadas na estação de pesquisas do Morro do Cachimbo /2/, estão apresentadas na Tabela VI.2.

**Tabela VI.2 - Parâmetros característicos das descargas atmosféricas**

Parâmetro	Dados CIGRÉ		Dados CEMIG	
	Média	$\sigma_{\ln}$	Média	$\sigma_{\ln}$
$I_{P2}$ (kA)	61,1 (*)	1,330 (*)	45,3	0,39
	33,3 (**)	0,605 (**)	-----	-----
$S_m$ (kA/ $\mu$ s)	24,3	0,599	19,4	0,290

(\*) Parâmetros para  $I_{\text{descarga}} < 20$  kA;

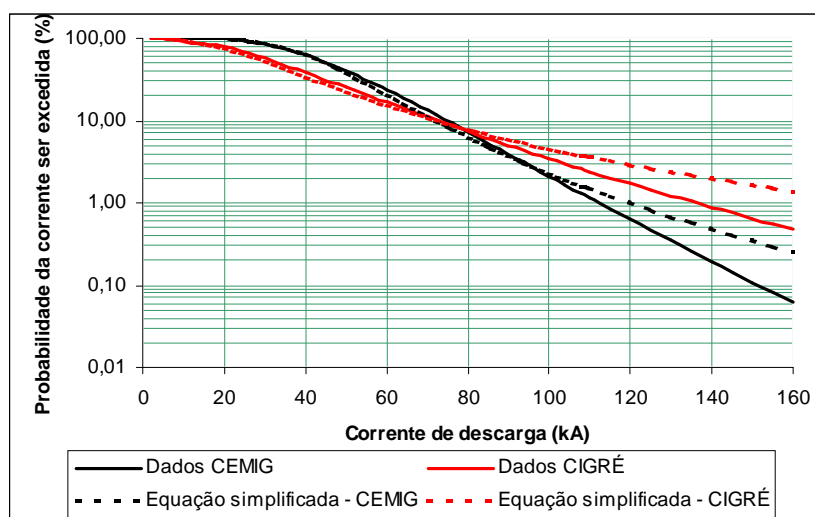
(\*\*) Parâmetros para  $I_{\text{descarga}} > 20$  kA;

As curvas de probabilidade de ocorrência das correntes de descarga descendentes negativas com valores de pico acima de uma determinada amplitude, obtidas para as medições efetuadas pelo CIGRÉ e pela CEMIG com base nos valores médios e nos desvios-padrão logarítmicos da Tabela VI.2, estão apresentadas na Figura VI.4.

Na mesma figura são apresentadas as curvas com a probabilidade  $P(I \geq I_0)$  da amplitude máxima da corrente de descarga exceder a uma corrente  $I_0$ , baseadas nas equações simplificadas propostas por Anderson - Eriksson (para os dados do CIGRÉ) e pela referência /9/ (para os dados da CEMIG):

$$P(I \geq I_0)_{CIGRE} = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_0}{31}\right)^{2,6}} \quad P(I \geq I_0)_{CEMIG} = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_0}{45}\right)^{4,7}}$$

$P(I \geq I_0)$  Probabilidade da ocorrência de correntes com amplitudes maiores do que a corrente  $I_0$  considerada.



**Figura VI.4 - Curvas de probabilidade de amplitude de correntes para descargas descendentes negativas**

Verifica-se da figura uma boa concordância entre as curvas obtidas considerando a função distribuição de probabilidade log-normal e as equações simplificadas para correntes com amplitudes da ordem de até 85 kA (dados CIGRÉ) e 110 kA (dados CEMIG), o que valida a utilização dessas equações para estudos de avaliação de desempenho de linhas de transmissão, tornando os estudos mais simplificados. No entanto, para estudos mais detalhados, sugere-se a utilização da função distribuição de probabilidade log-normal.

As informações sobre a distribuição de probabilidade para as correntes de descarga apresentadas referem-se a descargas atmosféricas descendentes com polaridade negativa. No caso das descargas positivas, que ocorrem em menor número, estes valores são geralmente bem maiores.



Para a taxa de crescimento das correntes o CIGRÉ sugere a seguinte equação para a determinação da probabilidade da ocorrência de taxas de crescimento de corrente superiores à taxa considerada:

$$P\left(\frac{dI}{dt} \geq \frac{dI_0}{dt}\right) = \frac{1}{1 + \left(\frac{dI_0/dt}{24}\right)^4}$$

## **VI.2 Descargas atmosféricas em linhas de transmissão**

As linhas de transmissão assim como as redes de distribuição tendem a ser um coletor de descargas. Duas diferentes abordagens devem ser consideradas na avaliação do desempenho dos sistemas elétricos frente às sobretensões resultantes das descargas atmosféricas: os efeitos originados por descargas atmosféricas incidindo diretamente sobre os condutores fase ou sobre os cabos pára-raios (em caso de sua existência) e os efeitos originados pelas descargas atmosféricas incidindo nas proximidades das redes de distribuição ou linhas com tensões não superiores a 44 kV (descargas indiretas), gerando sobretensões induzidas.

Embora as sobretensões causadas por descargas atmosféricas diretas possam atingir maiores amplitudes do que as sobretensões induzidas por descargas atmosféricas nas proximidades das redes de distribuição e linhas de transmissão, as sobretensões induzidas geralmente representam maiores problemas para empresas distribuidoras de energia elétrica devido à sua maior frequência de ocorrência, associada a baixa resistência oferecida pela isolação das redes de distribuição às sobretensões atmosféricas.

No caso de linhas de transmissão com tensões nominais iguais ou superiores a 69 kV as sobretensões induzidas, originadas por descargas atmosféricas nas proximidades das linhas, apresentam amplitudes inferiores às características disruptivas da isolação, não acarretando em desligamentos dessas linhas. Por esta razão, em estudos de desempenho de linhas de transmissão se considera somente os efeitos das descargas incidindo diretamente sobre as linhas.

### **VI.2.1 Incidência das descargas atmosféricas diretas em linhas de transmissão**

Considerando que as descargas atmosféricas diretas possam geralmente afetar o desempenho das linhas de transmissão, gerando sobretensões transitórias resultantes acima da suportabilidade da isolação das linhas, o número de descargas diretas coletadas pelo sistema é um dos fatores determinantes para a avaliação do seu desempenho.

A frequência com que as descargas atmosféricas descendentes incidem diretamente sobre as estruturas das linhas de transmissão, nos cabos pára-raios ou nos condutores fase, depende de uma série de fatores: as densidades

de descargas atmosféricas à terra nas regiões atravessadas pela linha; características físicas da linha, em especial a sua altura em relação ao solo e o espaçamento entre os condutores mais externos; a existência de objetos próximos a linha que constituem blindagens naturais, tais como árvores altas, estruturas metálicas, edificações nas proximidades da linha e existência de outras linhas de transmissão. Além disso, a incidência de descargas sobre uma dada linha de transmissão pode variar a cada ano, em função da maior ou menor incidência das descargas atmosféricas na região.

Para uma linha de transmissão localizada em uma região onde a densidade de descargas médias à terra por km<sup>2</sup> por ano é  $N_g$  e apresentando uma área de atração equivalente  $A$  (m<sup>2</sup>), o número médio de descargas diretas  $N_d$  coletadas por esta linha por 100 km por ano é:

$$N_d = N_g \cdot A \cdot 10^{-3} \cdot 100$$

- $N_d$  Número esperado de descargas atmosféricas que incidem diretamente sobre uma linha de transmissão ( descargas / (100 km . ano) );  
 $N_g$  Densidade de descargas à terra ( descargas / (km<sup>2</sup> . ano) );  
 $A$  Área de atração equivalente (m<sup>2</sup>).

Vários trabalhos abordam diferentes procedimentos para a determinação do raio de atração equivalente médio. Uma expressão bastante utilizada em estudos de desempenho de linhas de transmissão foi proposta por Eriksson /1/.

$$R_a = 0,84 \cdot H^{0,6} \cdot I^{0,74}$$

- $R_a$  Raio de atração equivalente (m);  
 $H$  Altura da estrutura (m);  
 $I$  Amplitude da corrente de descarga (kA).

Para uma corrente de descarga com amplitude média de 45 kA, o raio de atração equivalente pode ser expresso por:

$$R_a = 14 \cdot H^{0,6}$$

Deve ser ressaltado que a expressão acima representa o raio de atração equivalente médio para estruturas isoladas e para um valor médio de corrente de descarga considerado. Na realidade, o raio de atração de uma estrutura varia em função da intensidade da corrente de descarga.

De acordo com a referência /7/, as descargas atmosféricas podem atingir uma linha de transmissão dentro da sua faixa de exposição, segundo a expressão abaixo:

$$N_d = N_g \cdot (2 \cdot R_a + b) \cdot 10^{-1}$$

$$N_d = N_g \cdot (28 \cdot H^{0,6} + b) \cdot 10^{-1}$$

- $N_d$  Número esperado de descargas atmosféricas que incidem diretamente sobre uma linha de transmissão ( descargas / (100 km . ano) );
- $N_g$  Densidade de descargas à terra ( descargas / (km<sup>2</sup> . ano) );
- $H$  Altura média do condutor mais elevado em relação ao solo ou dos cabos pára-raios em relação ao solo, em caso da existência desses (m);
- $b$  Espaçamento horizontal entre cabos pára-raios (m).

A altura média equivalente ( $H$ ) do condutor mais elevado em relação ao solo é determinada por:

- Para um perfil plano:  $H = h_g - 2/3 \cdot (h_g - h_{gw})$
- Para um perfil ondulado:  $H = h_g$
- Para um perfil montanhoso:  $H = 2 \cdot h_g$

$h_g$  É a altura do cabo pára-raios ou do condutor mais elevado na torre;

$h_{gw}$  É a altura mínima do cabo pára-raios ou do condutor mais elevado no meio do vão.

É importante ressaltar que o número calculado de descargas que incidem sobre uma dada linha de transmissão é apenas um valor aproximado e orientativo, devido a natureza estatística da densidade de descargas à terra, a qual varia de ano para ano, além de outros fatores, tais como a presença de objetos que podem ajudar na blindagem do sistema e interceptar algumas das descargas que poderiam atingir as linhas.

O número de descargas diretas que incidem sobre uma linha de transmissão localizada nas proximidades de outras estruturas é influenciado pela área de captação de descargas dessas estruturas /10/. Desta forma, uma vez conhecidas as características da linha, a altura dos objetos próximos e a distância entre a linha de transmissão e esses objetos (outras linhas de transmissão, por exemplo), podem ser estabelecidos os fatores de blindagem.

Considerando o efeito de objetos elevados próximos à linha de transmissão, o número estimado de descargas diretas que incidem sobre a linha a cada ano por 100 km é dado por /10/:

$$N_{drd} = N_d \cdot (1 - S_{fc})$$

$N_{drd}$  Número de descargas atmosféricas que incidem diretamente sobre a linha de transmissão, considerando a presença de objetos próximos (descargas / (100 km - ano) );

$N_d$  Número de descargas atmosféricas que incidem diretamente sobre a linha, em caso da não existência de objetos próximos a linha;

$S_{fc}$  Fator de blindagem combinado ( $S_{fc} = 0$ )  $\rightarrow N_{drd} = N_d$ .

O fator de blindagem a ser considerado consiste na soma dos fatores obtidos para cada lado da linha de transmissão. Nos casos em que o fator de blindagem combinado se apresentar igual ou maior do que 100%, o número de descargas diretas incidindo sobre a linha será nulo.

Um fator de blindagem igual a zero significa que a linha de transmissão atravessa uma região onde a proximidade de objetos não afeta o número de descargas por ela coletadas. Por outro lado, um fator de blindagem igual a 1,0, indica que a linha se encontra totalmente protegida das descargas diretas em função dos objetos em suas proximidades.

### **VI.2.2 Desempenho das linhas de transmissão devido a descargas atmosféricas**

O desempenho das linhas de transmissão ou redes de distribuição submetidas ao efeito de uma descarga atmosférica varia significativamente em função das características de projeto das linhas e das condições do solo e ambientais das regiões atravessadas pela linhas.

O efeito de uma descarga atmosférica sobre uma linha de transmissão depende basicamente: do projeto e das características construtivas da linha; da impedância do sistema de aterramento para surtos; da amplitude e da forma de onda da corrente de descarga; do ponto de incidência da descarga (se diretamente sobre a rede ou em suas proximidades); das características de isolamento das linhas; do grau de proteção oferecido pelos cabos pára-raios (no caso de sua existência), etc. Todos esses fatores devem ser levados em consideração quando da análise do desempenho das linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas.

O comportamento transitório das ondas resultantes de tensão e de corrente para a análise das descargas atmosféricas incidindo sobre as redes elétricas ou em suas proximidades é altamente complexo, podendo ser efetivamente avaliado através de uma modelagem mais complexa através da utilização de ferramentas computacionais.

Três aspectos principais estão envolvidos no cálculo de desempenho de linhas de transmissão devido ao efeito das descargas atmosféricas: os aspectos relativos às características das correntes de descarga (valor de pico, duração de frente e taxa de crescimento da onda de corrente); os aspectos relativos ao processo de conexão entre o canal de descarga e os componentes da linha de transmissão; e por fim, os aspectos relacionados a resposta eletromagnética da linha atingida pela descarga atmosférica.

As linhas de transmissão podem apresentar várias configurações para as torres, condutores aéreos e para o aterramento das estruturas. Diferentes configurações para esses elementos estabelecem diferentes respostas transitórias sob solicitações de descargas atmosféricas, as quais refletem sobre os valores calculados para as sobretensões resultantes.

O comportamento transitório de uma linha de transmissão após a incidência de uma descarga atmosférica sobre o topo da estrutura ou sobre os cabos pára-raios, em caso de sua existência, depende de alguns fatores que necessitam ser cuidadosamente considerados para a avaliação de desempenho de linhas de transmissão: o ponto de incidência da descarga, a impedância equivalente

para surtos dos cabos pára-raios, o acoplamento eletromagnético entre os cabos pára-raios e os condutores fase, a resposta transitória da torre, o efeito das torres adjacentes, a resposta do sistema de aterramento, etc.

Vários modelos têm sido apresentados em publicações técnicas para o estudar e avaliar a resposta dos componentes das linhas de transmissão quando submetidos a incidência de uma descarga atmosférica. Alguns desses modelos individuais apresentam um elevado grau de elaboração e complexidade.

Modelos mais recentes foram desenvolvidos para levar em consideração a interação de todos os componentes presentes na linha /11/. Dentre esses modelos, um modelo bastante complexo e elaborado denominado “Modelo Eletromagnético Híbrido” – HEM – foi desenvolvido pelo Lightning Research Center /1/, /11/.

Apesar da complexidade do fenômeno, é possível obter-se através de conceitos básicos, uma análise estimativa e simplificada do efeito das descargas atmosféricas sobre os sistemas elétricos. A seguir, serão abordados aspectos referentes às descargas diretas e seus efeitos sobre as linhas de transmissão.

#### **VI.2.2.1 Descargas incidindo diretamente sobre linhas de transmissão sem cabos pára-raios**

As descargas atmosféricas ao incidirem diretamente sobre linhas de transmissão não providas de cabos pára-raios atingem, invariavelmente, os condutores fase. Considerando que não ocorra uma disrupção no ponto atingido, a corrente de descarga  $i(t)$  ao incidir sobre o condutor se divide (considerando a impedância do canal de descarga infinita) e se propaga como um surto de corrente em ambas as direções da linha, gerando o desenvolvimento de sobretensões  $v(t)$  na linha em ambas as direções. Considerando em uma primeira aproximação uma linha de transmissão sem perdas e sem distorções, as sobretensões resultantes podem ser calculadas pelo produto do surto de corrente variável no tempo com a impedância de surto monofásica da linha, ou seja:

$$V(t) = \frac{Z_0 \cdot i(t)}{2}$$

$Z_0$  Impedância de surto monofásica da linha ( $\Omega$ ), definida por:

$$Z_0 = \sqrt{L/C}$$

Considerando um condutor infinito acima de um solo de condutividade perfeita:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_R}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(2 \cdot \frac{h}{r}\right) \quad C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_R}{\ln\left(2 \cdot \frac{h}{r}\right)}$$

Substituindo L e C na expressão geral e considerando a linha aérea ( $\mu_R = 1$  e  $\epsilon_R = 1$ ), tem-se a seguinte expressão para a impedância de surto da fase atingida pela descarga:

$$Z_0 = 60 \cdot \ln\left(2 \cdot \frac{h}{r}\right)$$

$h$  é a altura do condutor em relação ao solo (m) e  $r$  o raio do condutor (m).

Considerando o efeito corona, a impedância de surto do condutor pode ser definida por:

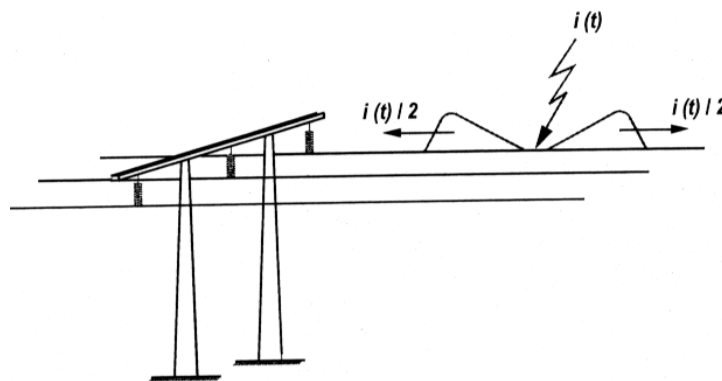
$$Z_{0C} = 60 \cdot \sqrt{\ln\left(2 \cdot \frac{h}{r}\right)} \cdot \sqrt{\ln\left(2 \cdot \frac{h}{R_c}\right)}$$

$Z_{0C}$  Impedância de surto da linha ( $\Omega$ ), considerando o efeito corona;

$R_c$  Raio do condutor sob efeito corona a um gradiente de tensão de 1500 kV / m /8/.

Devido ao acoplamento capacitivo entre os condutores, ocorre uma indução nos condutores adjacentes, gerando ondas de tensão com amplitudes de aproximadamente 25 a 30% da amplitude da sobretensão gerada no condutor atingido pela descarga podendo ocorrer, desta forma, uma descarga disruptiva entre fases se o espaçamento entre os condutores fases não for suficiente para suportar a diferença de tensão estabelecida entre as fases.

A ilustração de uma descarga atmosférica incidindo diretamente sobre os condutores fase de uma linha de transmissão sem cabos pára-raios é apresentada na Figura VI.5.



**Figura VI.5 - Descarga atmosférica sobre uma rede sem cabos pára-raios**

Assumindo que não ocorra disrupção entre fases, a amplitude e forma de onda da tensão incidente se modificam durante a sua propagação ao longo das redes de distribuição: pelo efeito das reflexões sucessivas nas estruturas adjacentes; pela redução na inclinação da frente de onda devido ao efeito corona; e pelas atenuações devido às perdas na linha. Se a amplitude da tensão resultante excede, em um dado instante, a tensão de descarga das cadeias de isoladores, ocorre a descarga disruptiva de impulso ("**flashover**")

através da(s) cadeia(s). Se o gradiente de campo elétrico for suficiente para manter o arco, a descarga disruptiva de impulso será seguida pelo arco de potência de frequência industrial, com a passagem da corrente de curto-circuito do sistema. Esta corrente pode provocar um desligamento transitório (caso não ocorra falhas elétricas ou mecânicas na isolação ou nos componentes da linha) ou permanente (em caso de falha da isolação ou dos componentes da rede).

A partir da equação para a tensão resultante, pode-se definir uma corrente crítica, que resulta em 50% de probabilidade de falha da isolação. Esta corrente pode ser estimada a partir da equação abaixo:

$$I_{cr}(t) = \frac{2 \cdot U_{50}(t)}{Z_{0C}}$$

$U_{50}(t)$  Tensão crítica de descarga da cadeia de isoladores no tempo  $t$  (kV);

De uma maneira mais realista, conhecendo-se a característica disruptiva da isolação, é possível definir a corrente que provoca a descarga disruptiva:

$$I_{dis}(t) = \frac{2 \cdot U_{dis}(t)}{Z_{0C}}$$

$U_{dis}(t)$  Tensão disruptiva assegurada da isolação para impulso no tempo  $t$  (kV).

Conhecendo-se as características disruptivas da isolação, é possível estimar a amplitude de corrente que provoca a descarga disruptiva de impulso da isolação. A partir deste valor de corrente, pode-se estimar a probabilidade da incidência de correntes com amplitudes superiores a corrente obtida, conforme apresentado na Figura VI.4.

Uma análise simplificada indica que praticamente todas as descargas atmosféricas incidindo diretamente sobre os condutores fase das linhas de transmissão provocam uma descarga disruptiva da isolação, independente da resposta transitória do sistema de aterramento.

Desta forma, o número de desligamentos de uma linha de transmissão devido a incidência de descargas diretas sobre os condutores fase pode ser estimado por:

$$N_{desl} = N_d \cdot P_{disrup} \cdot P_{arco}$$

$N_{desl}$	Número estimado de desligamentos da linha de transmissão (desligamentos por 100 km por ano);
$N_d$	Número estimado de descargas que incidem diretamente sobre os condutores fase (descargas por 100 km por ano);
$P_{disrup}$	Probabilidade da ocorrência de descarga disruptiva da isolação;
$P_{arco}$	Probabilidade da descarga disruptiva ser seguida pelo arco de potência.

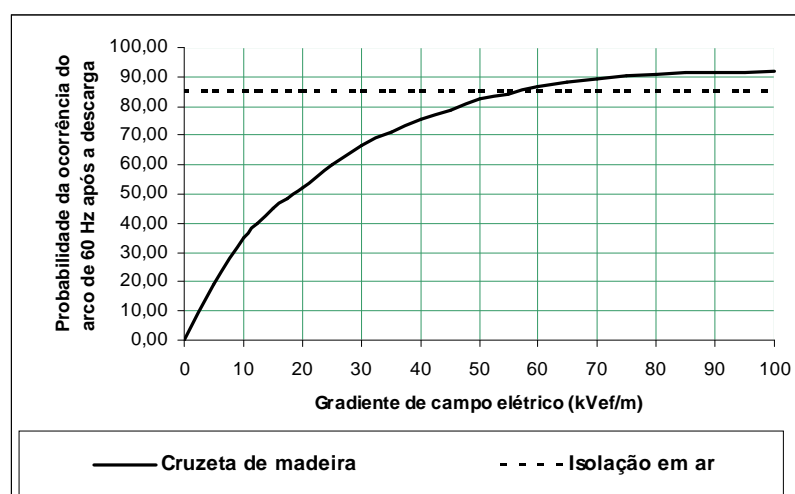
Alguns estudos apresentam informações sobre a probabilidade da disrupção ser seguida pelo arco de potência /12-13/. De acordo com estudos realizados, a probabilidade de uma disrupção ser seguida pelo arco de potência depende das características da isolação da estrutura: 85% para cadeias de isoladores utilizadas em linhas de transmissão (isolação do ar), independente do gradiente de campo elétrico estabelecido após a disrupção /13/; no caso da utilização de isolação adicional através da utilização de cruzetas e estruturas de madeira, a referência /12/ indica uma forte influência do gradiente de campo elétrico estabelecido na isolação após a ocorrência da disrupção, sobre a probabilidade da disrupção ser seguida pelo arco de potência. Neste caso, o gradiente de campo elétrico estabelecido na isolação após a ocorrência da descarga disruptiva, pode ser estabelecido pela seguinte equação:

$$E = \frac{V_{ft}}{L_{isolação}}$$

E	Gradiente de campo elétrico após a disrupção (kV / m);
$V_{ft}$	Valor eficaz da tensão fase-terra de frequência industrial (kV);
$L_{isolação}$	Comprimento da isolação adicional (m).

Uma síntese das informações apresentadas nas referências /12-13/ para cruzetas de madeira e isolação no ar é ilustrada na Figura VI.6.

Com base nas informações acima, pode ser constatado que a probabilidade de uma descarga atmosférica, incidindo sobre os condutores fase de uma linha de transmissão provocar o desligamento da linha, está associada à probabilidade da descarga disruptiva ser seguida por um arco de potência, fator que depende do tipo de isolação considerada e, no caso da utilização de uma isolação adicional (madeira ou polímero), das características do material e da distância da isolação até o ponto de aterramento.

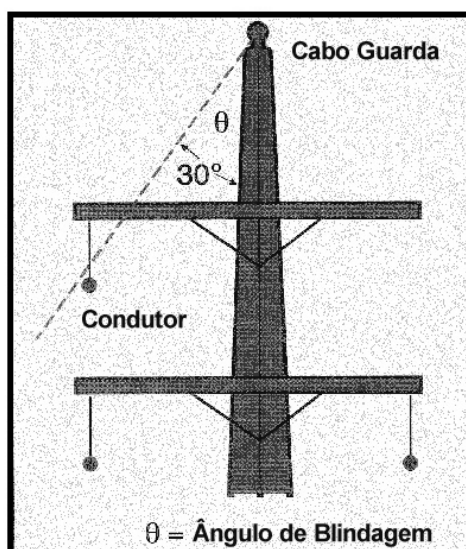


**Figura VI.6 - Curvas de probabilidade das descargas disruptivas serem seguidas pelo arco de potência, em função do gradiente de campo elétrico /11-12/**



### VI.2.2.2 Descargas incidindo diretamente sobre linhas de transmissão providas de cabos pára-raios

A grande maioria das descargas atmosféricas que incidem em linhas de transmissão protegidas por cabos pára-raios adequadamente posicionados irão incidir sobre esses ou sobre a estrutura. De uma maneira geral, o sistema é considerado adequadamente protegido pelos cabos pára-raios quando o ângulo de blindagem entre o(s) cabo(s) pára-raios e os condutores fase é inferior a  $30^\circ$ , conforme ilustrado na Figura VI.7. Metodologias bastante detalhadas para uma blindagem efetiva das redes / linhas aéreas através da utilização de cabos pára-raios, podem ser encontradas nas referências /14-16/.

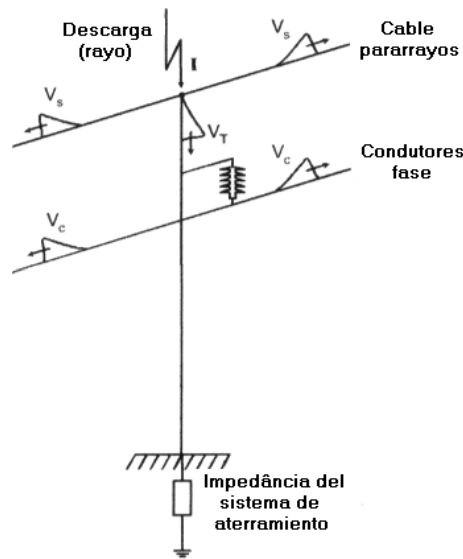


**Figura VI.7 – Ilustração da determinação simplificada do ângulo de blindagem entre os condutores fase e o cabo pára-raios**

As descargas atmosféricas, ao incidirem nos topos das estruturas ou sobre os cabos pára-raios geram ondas incidentes de corrente que se propagam pelos cabos pára-raios e através das estruturas. Quando a descarga atinge uma estrutura, grande parte da corrente se propaga através da estrutura atingida, sendo esta corrente dependente das características da forma de onda da corrente de descarga incidente e do comportamento do sistema de aterramento da estrutura atingida pela descarga. Estas ondas de corrente se refletem, inicialmente, no topo da torre e no sistema de aterramento e geram sobretensões resultantes nas estruturas e ao longo dos cabos pára-raios, elevando a tensão das estruturas acima do potencial de terra. A Figura VI.8 ilustra o comportamento das ondas viajantes quando da incidência de uma descarga atmosférica sobre uma estrutura de uma linha de transmissão.

Vários aspectos têm influência significativa na resposta transitória das linhas de transmissão com cabos pára-raios quando submetidas às descargas atmosféricas diretas: a amplitude e a forma de onda da corrente de descarga; o ponto de incidência das descargas; a impedância transitória equivalente dos cabos pára-raios; o acoplamento eletromagnético entre os condutores fase e os cabos pára-raios; a resposta transitória da estrutura; o efeito das estruturas

adjacentes; e, principalmente, a resposta transitória do sistema de aterramento.



**Figura VI.8 – Representação de uma descarga atmosférica incidindo sobre uma estrutura de uma linha de transmissão**

A tensão resultante no topo de uma estrutura atingida por uma descarga atmosférica no instante de tempo  $t$  em  $\mu s$  pode ser estimada, com base no modelo simplificado apresentado na referência /16/:

$$V_T(t) = Z_I \cdot I(t) - Z_W \cdot \sum_{n=1}^N [I(t - 2 \cdot n \cdot \tau_T) \cdot \psi^{n-1}]$$

$$Z_I = \frac{Z_S \cdot Z_T}{Z_S + 2 \cdot Z_T} \quad Z_W = \frac{(2 \cdot Z_S^2 \cdot Z_T) \cdot (Z_T - R)}{(Z_S + 2 \cdot Z_T)^2 \cdot (Z_T + R)} \quad \psi = \frac{(2 \cdot Z_T - Z_S) \cdot (Z_T - R)}{(2 \cdot Z_T + Z_S) \cdot (Z_T + R)}$$

- $V_T(t)$  Tensão resultante na estrutura atingida pela descarga no instante  $t$  (kV);
- $t$  Instante de tempo considerado ( $\mu s$ );
- $I(t)$  Corrente de descarga (kA) no instante de tempo  $t$  considerado ( $\mu s$ );
- $\tau_T$  Tempo de propagação da onda desde o topo da torre atingida pela descarga até a sua base, correspondente a relação entre altura da torre e a velocidade de propagação da luz no vácuo ( $\mu s$ );
- $Z_I$  Impedância equivalente do circuito vista pela corrente de descarga, no instante da sua incidência ( $\Omega$ );
- $Z_W$  Impedância de onda constante, na qual todas as componentes das ondas viajantes de corrente atuam para estabelecer as componentes de tensão no topo da estrutura ( $\Omega$ );
- $\psi$  Constante de amortecimento, que reduz as contribuições das reflexões sucessivas para a tensão resultante no topo da estrutura;
- $N$  O maior valor que o número de ondas  $n$  pode atingir, correspondente ao maior número inteiro  $\leq t / 2 \cdot \tau_T$ .

O parâmetro  $Z_s$  corresponde a impedância equivalente para surtos dos cabos pára-raios que saem da estrutura atingida para as estruturas adjacentes;  $Z_T$  corresponde a impedância de surto das estruturas e  $R$  o comportamento do sistema de aterramento da estrutura atingida pela descarga.

Considerando a forma de onda da corrente de descarga tipo rampa  $I = A \cdot t$ , a tensão resultante sobre a estrutura atingida pela descarga atmosférica pode ser obtida no instante de tempo  $t$  em  $\mu s$ , pela seguinte equação /16/:

$$V_T(t) = A \cdot t \cdot \left( Z_1 - \frac{Z_w \cdot (1 - \psi^N)}{1 - \psi} \right) + 2 \cdot A \cdot \tau_T \cdot Z_w \cdot \left( \frac{(1 - \psi^N)}{(1 - \psi)^2} - \frac{N \cdot \psi^N}{(1 - \psi)} \right)$$

A Taxa de crescimento da onda de corrente de descarga (kA/ $\mu s$ );

Ao se analisar com um maior grau de profundidade o comportamento transitório de uma linha de transmissão atingida por uma descarga atmosférica, é importante considerar o efeito das torres adjacentes. A influência das torres adjacentes nas tensões resultantes ao longo da linha é maior para menores distâncias entre vãos. Este fato pode ser explicado pelo tempo de propagação das ondas de tensão e de corrente ao longo da linha, sendo fortemente influenciado pelo tempo de frente da onda de corrente. Considerando, por exemplo, uma distância entre vãos de 600 m para uma onda de corrente com tempo de frente de 2,0  $\mu s$ , uma onda viajante de tensão se propagando ao longo da linha a uma velocidade de 300 m/ $\mu s$  necessita de um tempo de 4,0  $\mu s$  para se propagar da torre atingida pela descarga à torre adjacente e retornar. Como o tempo de frente da onda de corrente é 2,0  $\mu s$ , o efeito da reflexão devido à torre adjacente na torre atingida pela descarga ocorre após a onda de tensão atingir a sua amplitude máxima, não afetando a amplitude máxima da tensão. Por outro lado, para um vão de 250 m, a mesma onda de tensão se propaga da torre atingida às torres adjacentes e retorna em 1,67  $\mu s$ , antes da corrente atingir o seu valor máximo.

Alguns modelos simplificados para análise do comportamento transitório de linhas de transmissão e outros modelos, bastante complexos, não consideram o efeito das estruturas adjacentes, pelo fato do tempo necessário para a onda de corrente atingir o seu valor máximo ser menor do que duas vezes o tempo de propagação das ondas viajantes de tensão e de corrente entre a estrutura atingida pela descarga e as torres adjacentes. Esta simplificação pode ser razoável para estudos de linhas de transmissão, onde o espaçamento entre as estruturas de linhas de transmissão é geralmente maior do que 300 metros (considerando uma onda de corrente com tempo de frente de até 2  $\mu s$ ). No entanto, para linhas com menores vãos médios, a não consideração do efeito das torres adjacentes acarreta em erros significativos no resultado final.

Deste modo, o efeito das torres adjacentes deve ser considerado quando tempo de duração da frente da descarga for menor do que duas vezes o tempo de propagação das ondas de tensão e corrente entre a torre atingida e as torres adjacentes.

Outro ponto que deve ser destacado, é que a maioria dos estudos de desempenho de linhas realizados consideram a linha com um vão médio constante ao longo de toda a sua extensão. Em muitas situações esta consideração simplificada pode acarretar em erros significativos na resposta final das tensões resultantes ao longo da linha.

No instante em que uma descarga incide sobre a estrutura ou sobre os cabos pára-raios, tensões são induzidas nos condutores fase, resultantes do acoplamento capacitivo entre esses condutores e o(s) cabo(s) pára-raios. Em uma análise simplificada, as tensões induzidas nos condutores fase apresentam uma relação linear com a sobretensão desenvolvida no topo da estrutura e podem ser obtidas pela equação indicada a seguir:

$$V_{ind}(t) = C_i \cdot V_T(t)$$

$V_{ind}(t)$  Tensão induzida sobre os condutores fase;

$C_i$  Fator de acoplamento entre condutores fase e cabos pára-raios.

O fator de acoplamento é função dos espaçamentos relativos dos condutores fase para a terra e dos condutores fase para o cabo pára-raios, e varia para as diferentes fases. Para uma linha de transmissão com um cabo pára-raios:

$$C_i = \frac{\log(b/a)}{\log(2 \cdot h/r)}$$

$b$  Distância do condutor fase para a imagem do cabo pára-raios;

$a$  Distância do condutor fase considerado para o cabo pára-raios;

$h, r$  Altura do cabo pára-raios;

$r$  Raio do condutor utilizado no cabo pára-raios.

Para o caso de dois cabos pára-raios, deve-se levar em consideração o efeito da influência mútua entre os cabos pára-raios. A referência /14/ apresenta o procedimento para a determinação do fator de acoplamento quando da existência de dois cabos pára-raios.

Desprezando o efeito dos braços das estruturas, as tensões resultantes sobre as cadeias de isoladores (ou sobre a isolação, em caso da utilização de cruzetas de madeira ou poliméricas), consistem na diferença de potencial que se estabelece entre a estrutura e as respectivas tensões induzidas nos condutores fase, podendo ser estimada, de forma simplificada, por:

$$V_{CI}(t) = V_T(t) - C_i \cdot V_T(t) \pm V_{60Hz}$$

$$V_{CI}(t) = V_T(t) \cdot (1 - C_i) \pm V_{60Hz}$$

$V_{60Hz}$  Valor instantâneo da tensão de frequência industrial.

De modo mais conservativo, considera-se que a descarga atmosférica atinge a estrutura ou os cabos pára-raios no instante em que a tensão de frequência

industrial atinge o seu valor máximo na polaridade inversa a polaridade da descarga. Para esta condição, o valor de crista da tensão de frequência industrial é adicionado à tensão transitória que se estabelece na isolação.

A equação acima mostra em uma análise mais simplificada, que a amplitude das sobretensões sobre as cadeias de isoladores (ou sobre a isolação, em caso da utilização de cruzetas de madeira ou poliméricas), devido a uma corrente de descarga, apresenta uma relação quase que linear com a sobretensão desenvolvida no topo da estrutura. Para estudos mais precisos e detalhados, as influências do efeito do acoplamento entre estruturas, cabos pára-raios e condutores fase, bem como o efeito dos braços das estruturas devem ser consideradas e melhor avaliadas.

A referência /14/ apresenta a seguinte expressão para a determinação das tensões resultantes sobre as cadeias de isoladores, considerando o efeito dos braços das torres. A equação abaixo é baseada no modelo simplificado, que não considera o efeito das torres adjacentes.

$$V_{sn}(t + \tau_{pn}) = V_{pn}(t + \tau_{pn}) - C_n \cdot V_T(t + \tau_{pn})$$

$$V_{sn}(t + \tau_{pn}) = V_R(t + \tau_T) + \frac{\tau_T - \tau_{pn}}{\tau_T} \cdot [V_T(t) - V_R(t + \tau_T)] - C_n \cdot V_T(t)$$

$V_{sn}(t + \tau_{pn})$	Tensão resultante nas cadeias de isoladores no instante $t + \tau_{pn}$ ;
$V_{pn}(t + \tau_{pn})$	Tensão resultante no braço da estrutura considerado;
$V_T(t + \tau_{pn})$	Tensão resultante no topo da estrutura no instante $t + \tau_{pn}$ ;
$C_n$	Fator de acoplamento entre condutores fase e cabos pára-raios.
$\tau_{pn}$	Tempo de propagação da onda do topo da estrutura até o braço da estrutura considerado ( $\mu s$ );
$\tau_T$	Tempo de propagação da onda desde o topo da torre atingida pela descarga até a sua base, correspondente a relação entre altura da torre e a velocidade de propagação da luz no vácuo ( $\mu s$ );
$V_T(t)$	Tensão resultante na estrutura atingida no instante $t$ (kV);
$t$	Instante de tempo considerado ( $\mu s$ );
$V_R(t + \tau_T)$	Tensão resultante no sistema de aterramento no instante $t + \tau_T$ ;

$$V_R(t + \tau_T) = \alpha_R \cdot A \cdot Z_I \cdot \left[ \left( \frac{1 - \psi^{N+1}}{1 - \psi} \right) \cdot t - 2 \cdot \psi \cdot \left( \frac{(1 - \psi^N)}{(1 - \psi)^2} - \frac{N \cdot \psi^N}{(1 - \psi)} \right) \cdot \tau_T \right]$$

$$V_{pn}(t + \tau_{pn}) = V_R(t + \tau_T) + \frac{h - Y_n}{h} \cdot [V_T(t) - V_R(t + \tau_T)]$$

$$\alpha_R = \frac{2 \cdot R}{Z_T + R}$$

$h$	Altura da estrutura (m);
$Y_n$	Distância do topo da estrutura ao ponto do braço da estrutura considerado (m);

Este modelo tem sido considerado em vários programas computacionais utilizados para avaliar o desempenho de linhas de transmissão.

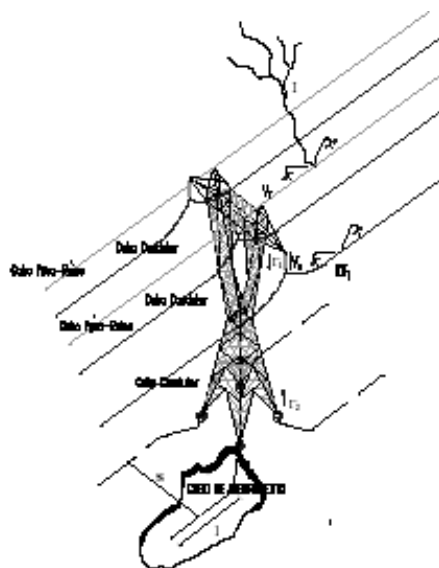
As informações acima se referem à incidência de descargas sobre o topo das estruturas. Em caso de incidência sobre os cabos pára-raios, a corrente de descarga se divide e se propaga ao longo desses, gerando tensões incidentes em ambas as direções da linha de transmissão definidas por:

$$V_s(t) = \frac{Z_s \cdot i(t)}{2}$$

$V_s(t)$  Tensão que se propaga pelos cabos pára-raios (kV);

$Z_s$  Impedância de surto do cabo pára-raios ( $\Omega$ ).

A amplitude dessas tensões será tanto maior quanto maior for a distância do ponto de incidência das descargas em relação as torres, sendo portanto o meio do vão, o ponto de incidência da descarga que produz a maior tensão incidente. A Figura VI.9 ilustra o comportamento das ondas viajantes quando da incidência de uma descarga atmosférica sobre o cabo pára-raios /17/.



**Figura VI.9 – Representação de uma descarga atmosférica incidindo sobre o cabo pára-raios**

A tensão  $(1 - C_i) \cdot V_s$  a qual o isolamento entre os cabos pára-raios e os condutores fase ficará submetido é significativamente maior do que a tensão a qual a cadeia de isoladores ficaria submetida se uma descarga de mesma intensidade atingisse a torre. Desta forma, é importante que os cabos condutores e pára-raios se encontrem suficientemente afastados para impedir a ocorrência de desligamentos devido à ruptura do isolamento entre os condutores fase e os cabos pára-raios ao longo dos vãos.

Assumindo que não ocorreu a falha da isolação no meio do vão, a tensão  $V_s$  se propaga pelos cabos pára-raios em direção às estruturas mais próximas,

alcançando a estrutura em um tempo  $\tau_1$ , correspondente ao tempo para a onda de tensão se propagar do ponto de incidência da descarga à estrutura considerada. Desprezando os efeitos de atenuação e distorção, que modificam respectivamente a amplitude e a taxa de crescimento da onda de tensão incidente, a tensão no topo da estrutura atingida, a partir do instante  $\tau_1$  até a ocorrência da próxima reflexão (tempo  $\tau + \tau_1$ ) devido as estruturas adjacentes, pode ser estimada por:

$$V_T(t) = \left( \frac{2 \cdot Z_s \cdot R}{2 \cdot Z_s \cdot R + Z_s^2} \right) \cdot Z_s \cdot \left( \frac{A \cdot (t - \tau_1)}{2} \right)$$

- $V_T(t)$  Tensão no topo da estrutura no instante  $t$  (kV) no intervalo  $\tau_1 \leq t < \tau + \tau_1$ ;  
 $A$  Taxa de crescimento da corrente de descarga (kA/ $\mu$ s);  
 $Z_s$  Impedância de surto do cabo pára-raios ( $\Omega$ );  
 $R$  Impedância do sistema de aterramento da estrutura no instante  $\tau_1$  ( $\Omega$ ) (dependendo do tipo de aterramento considerado e da corrente impulsiva que se propaga pelo aterramento, pode ocorrer o efeito de ionização do solo);

Após atingirem a estrutura, as ondas de tensão e de corrente se propagam em direção às estruturas adjacentes, onde são refletidas e retornam à estrutura sob análise em tempos  $(\tau + \tau_1)$  – efeito da outra estrutura conectada ao cabo pára-raios atingido pela descarga;  $(2\tau + \tau_1)$  – onde  $2 \cdot \tau$  corresponde ao tempo de propagação entre a estrutura considerada e as estruturas adjacentes e retorno à estrutura considerada; e assim por diante. Neste instante, novas reflexões ocorrem devido à diferença entre as impedâncias de surto do cabo pára-raios e a impedância equivalente vista pelo cabo pára-raios no ponto da estrutura, que corresponde ao paralelo entre a impedância do cabo pára-raios a frente da estrutura e a impedância de aterramento da estrutura. Essas reflexões modificam a forma de onda da tensão resultante na estrutura. Este fenômeno se repete durante a ocorrência do transitório.

Desprezando o efeito dos braços das estruturas, as tensões resultantes sobre a isolamento da linha consistem na diferença de potencial que se estabelece, ao longo do tempo, entre a estrutura e as respectivas tensões induzidas nos condutores fase:

$$V_{CI}(t) = V_T(t) - C_i \cdot V_T(t) \pm V_{60Hz}$$

Sob o ponto de vista prático, as tensões resultantes sobre a isolamento são geralmente maiores quando da incidência das descargas diretamente sobre as estruturas. Em razão disso, os estudos de desempenho de linhas de transmissão com cabos pára-raios, são realizados considerando-se geralmente a incidência das descargas sobre as estruturas.

Em muito dos casos, as sobretensões resultantes que aparecem sobre a isolamento quando da incidência de descargas atmosféricas sobre as estruturas ou sobre os cabos pára-raios podem ser elevadas o suficiente para provocar a

disrupção da isolação, acarretando em uma descarga disruptiva de retorno (“**backflashover**”) nas cadeias de isoladores. Neste caso, há a disrupção da isolação da estrutura para o condutor.

Condutores fase mais afastados do(s) cabo(s) pára-raios apresentam menores amplitudes de tensões induzidas. Portanto, a isolação dessas fases são geralmente solicitadas por uma maior amplitude de tensão.

Estudos de desempenho de linhas de transmissão são realizados de modo a se determinar, para a condição atual da linha de transmissão, a corrente de disrupção que acarreta no desenvolvimento de sobretensões resultantes suficientemente elevadas através das cadeias de isoladores, provocando a sua descarga disruptiva de impulso.

Desta forma, o número de desligamentos de uma linha de transmissão com cabos pára-raios, devido à incidência de descargas atmosféricas sobre as estruturas ou nos cabos pára-raios, pode ser estimado de forma idêntica ao caso de linhas sem cabos pára-raios, ou seja:

$$N_{dest} = N_d \cdot P_{disrupção} \cdot P_{arco}$$

$N_{desl}$	Número de desligamentos da linha de transmissão devido a descargas atmosféricas (desligamentos por 100 km por ano);
$N_d$	Número de descargas que incidem sobre as estruturas ou nos cabos pára-raios (descargas por 100 km por ano);
$P_{disrupção}$	Probabilidade da ocorrência de descarga disruptiva da isolação;
$P_{arco}$	Probabilidade da descarga disruptiva de retorno ser seguida pelo arco de potência.

De modo análogo ao estudo de linhas de transmissão sem cabos pára-raios, se após a disrupção da isolação o gradiente de campo elétrico for suficiente para manter o arco, a descarga disruptiva de retorno será seguida pelo arco de potência de frequência industrial e pela corrente de curto-circuito do sistema, provocando um desligamento não programado da linha de transmissão. Geralmente, este fenômeno está associado a desligamentos transitórios, sendo pouco provável a ocorrência de danos permanentes nas estruturas ou falhas na isolação e/ou nos componentes da linha que possam acarretar em um desligamento permanente.

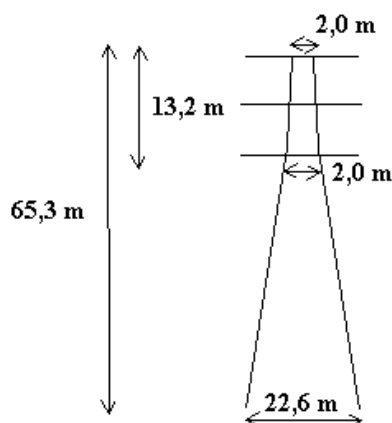
Conforme mencionado anteriormente, vários aspectos têm influência na resposta transitória das linhas de transmissão com cabos pára-raios atingidas pelas descargas: o ponto de incidência das descargas, as características das correntes de descarga, a impedância equivalente dos cabos pára-raios para surtos, o acoplamento eletromagnético entre os condutores fase e os cabos pára-raios, a resposta transitória da torre, o efeito das torres adjacentes, a modelagem utilizada para a disrupção da isolação e, principalmente, a resposta transitória do sistema de aterramento.



Dos vários aspectos que influenciam no comportamento transitório das linhas de transmissão com cabos pára-raios devido ao efeito das descargas atmosféricas, a resposta transitória do sistema de aterramento para as ondas tráfegantes de tensão e corrente é o parâmetro de maior importância no resultado final.

De forma a avaliar a influência do sistema de aterramento nas sobretensões resultantes estabelecidas nos terminais das cadeias de isoladores quando da incidência de uma descarga, foi realizado um estudo comparativo considerando um modelo simplificado para diferentes configurações de aterramento, usualmente utilizadas em estudos de desempenho de linhas de transmissão, e um modelo complexo, denominado Modelo Eletromagnético Híbrido /1, 11/.

O estudo foi realizado considerando uma linha de transmissão com tensão nominal de 138 kV, apresentando configuração dos condutores na vertical, em circuito duplo. Os diâmetros para os condutores fase e para os cabos pára-raios são de 31,90 mm e 9,52 mm, respectivamente. A altura dos cabos pára-raios em relação ao solo é de 65,3 m e as alturas consideradas para os condutores ao solo são de 52,1 m, 56,7m e 61,3 m. As distâncias do centro da torre para os condutores fase e cabos pára-raios são de 3,5 m para cada lado. A torre tipo metálica é representada pelo circuito equivalente mostrado na Figura VI.10.



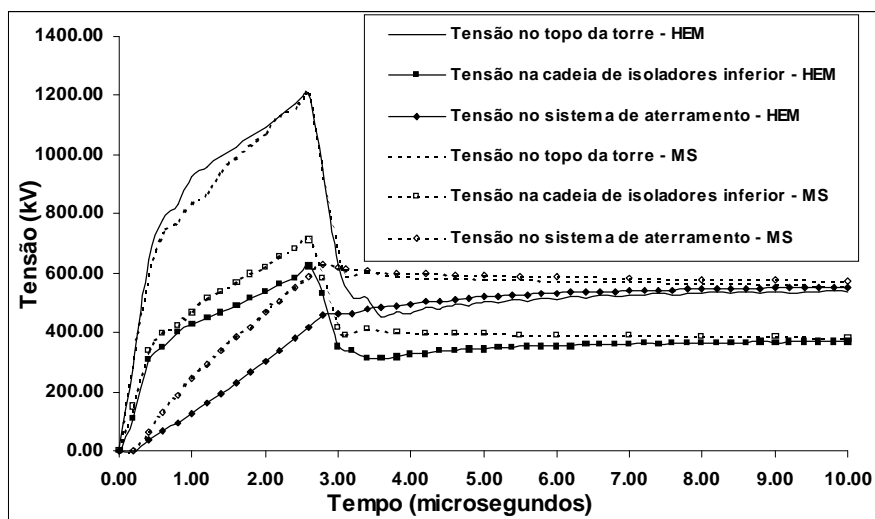
**Figura VI.10 – Características das torres utilizadas no estudo /18/**

O sistema de aterramento da torre é constituído por quatro eletrodos com comprimento de 3 metros e diâmetro de 19 mm e um sistema de contrapeso disposto em uma configuração radial, apresentando quatro pernas com comprimento de 20 metros cada. O condutor utilizado no contrapeso tem um diâmetro de 9,52 mm. A resistividade do solo considerada no estudo foi de 1000  $\Omega \cdot m$ .

A resposta transitória da linha foi obtida por simulação computacional utilizando-se um modelo bastante complexo baseado no Modelo Eletromagnético Híbrido e em modelos simplificados utilizando o programa ATP Draw. Para ambos modelos foi considerada uma descarga de corrente tipo rampa com forma de onda 2,6 / 62  $\mu s$  e valor de pico de 42 kA, incidindo no

topo da estrutura. Os efeitos da tensão de frequência industrial e das torres adjacentes sobre as tensões resultantes não foram considerados neste estudo. Para evitar as reflexões nas ondas de tensão e de corrente, as extremidades dos cabos pára-raios foram conectadas a resistências com valores correspondentes a impedância de surto dos cabos.

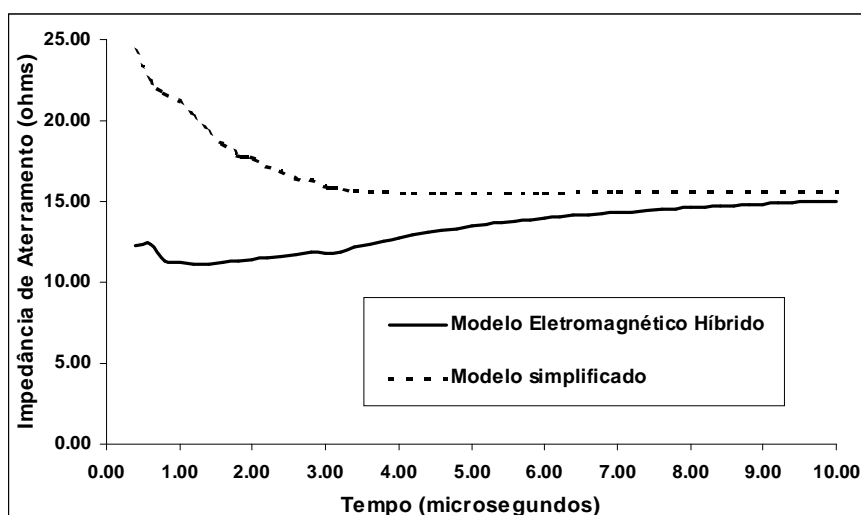
As tensões transitórias resultantes no topo da torre atingida pela descarga, nos terminais da cadeia de isoladores da fase inferior (condutor mais próximo do solo) e no sistema de aterramento, obtidas com os Modelos Eletromagnético Híbrido e simplificado, são apresentadas na Figura VI.11 /18/.



**Figura VI.11- Tensões transitórias no topo da estrutura, através da cadeia de isoladores inferior e através do sistema de aterramento: Modelos HEM e simplificado.**

Como pode ser visto na Figura VI.11, a tensão no topo da torre obtida com modelo simplificado apresentou uma boa concordância com o valor obtido pelo Modelo HEM. No entanto, a tensão na fase inferior apresentou uma característica superior àquela obtida com o modelo HEM. O valor de pico obtido com o modelo simplificado foi aproximadamente 13% maior do que o valor obtido com o Modelo HEM. Esta diferença significativa está associada a resposta transitória dos modelos utilizados para o sistema de aterramento.

A característica da tensão resultante através do sistema de aterramento obtida com o modelo simplificado apresentou valores de tensão maiores do que os valores obtidos com o modelo HEM para tempos mais rápidos. Para tempos mais longos, onde a resposta do sistema de aterramento é governada praticamente pela resistência de baixa frequência, as tensões resultantes no sistema de aterramento apresentaram uma boa concordância para ambos os modelos. A resposta transitória da impedância de aterramento equivalente para os modelos HEM e simplificado é apresentada na Figura VI.12.



**Figura VI.12- Resposta transitória da impedância de aterramento: Modelos HEM e simplificado**

Ao se analisar essa figura é possível observar uma boa concordância entre os resultados obtidos com os diferentes modelos para tempos mais longos, onde o efeito transitório do sistema de aterramento é menor. No entanto, para tempos mais rápidos, a resposta do sistema de aterramento não apresentou uma concordância satisfatória para os dois modelos.

É importante destacar que alguns dos programas / modelos utilizados para avaliar o desempenho das linhas de transmissão devido às descargas atmosféricas consideram o modelo para o sistema de aterramento semelhante ao modelo simplificado considerado neste estudo.

Simulações adicionais foram realizadas, considerando diferentes configurações bastante simplificadas para o sistema de aterramento. Esses modelos têm sido aplicados a programas atualmente utilizados para avaliar o desempenho de linhas de transmissão. Cinco diferentes modelos foram considerados: (1) Modelo Eletromagnético Híbrido; (2) Modelo simplificado utilizando o programa ATP Draw com o modelo de aterramento baseado no método proposto por Bewley; (3) Modelo considerando uma resistência de aterramento concentrada com valor constante de 53,3  $\Omega$ ; (4) Resistência concentrada com o valor equivalente a impedância transitória de aterramento obtida com o Modelo HEM ( $R = V_{\max} / I_{\max} = 14 \Omega$ ); (5) Resistência concentrada igual a resistência equivalente de baixa frequência -  $R = 20 \Omega$ .

As máximas tensões obtidas na torre e através das cadeias de isoladores são apresentadas na Tabela VI.3.

A partir das informações apresentadas na Tabela VI.3, é possível observar uma forte influência do modelo utilizado para o sistema de aterramento nas tensões transitórias resultantes que se estabelecem ao longo da linha.

**Tabela VI.3 - Tensões máximas: Efeito do sistema de aterramento**

Modelo Tipo	Tensões máximas (valores de pico) kV			
	VT	VA	VB	VC
1	1200	574	618	626
2	1200	601	671	706
3	1305	659	739	784
4	1114	557	620	652
5	1293	652	732	776

VT – Tensão no topo da torre

VA – Tensão através da cadeia de isoladores superior

VB – Tensão através da cadeia de isoladores intermediária

VC – Tensão através da cadeia de isoladores inferior

Um fato importante a ser destacado é que os modelos tipos 3 e 5 são aplicados em vários programas computacionais utilizados para a avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Nesses programas, as tensões no topo da torre e através das cadeias de isoladores são consideradas para a obtenção das correntes críticas, utilizadas para definir as probabilidades de desligamento das linhas para um dado sistema sob estudo.

A resistividade do solo e a impedância do sistema de aterramento são parâmetros relevantes na obtenção do índice de desligamento de linhas de transmissão com cabos pára-raios. Quanto maiores forem os valores de impedância de aterramento considerados para as estruturas, maiores serão as tensões resultantes no topo das estruturas e nos terminais das cadeias de isoladores, aumentando a probabilidade de desligamento dos sistemas.

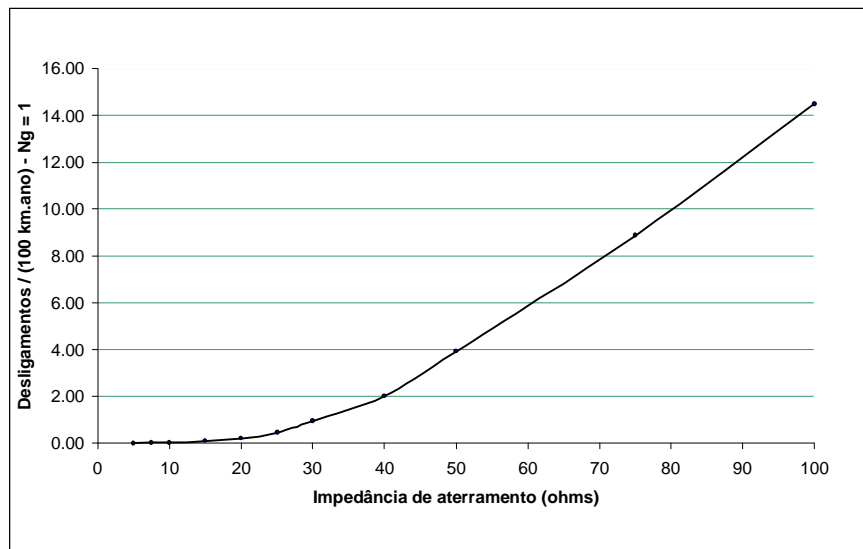
A Figura VI.13 apresenta um estudo realizado para a estimativa do número de desligamentos de uma linha de transmissão de 220 kV em função da impedância do sistema de aterramento ( $N_g = 1$  descarga / ( $\text{km}^2 \cdot \text{ano}$ )).

Outro fator importante e que influencia no desempenho de linhas de transmissão e redes de distribuição com cabos pára-raios consiste na localização dos pontos de aterramento e nos valores de resistência das estruturas adjacentes. A Figura VI.14 apresenta os resultados de um estudo referente ao efeito do aterramento sobre a probabilidade de interrupção da isolação, realizado para uma linha de 34,5 kV. A estrutura considerada no estudo é a tipo N1 e o vão médio entre estruturas é de 62 metros.

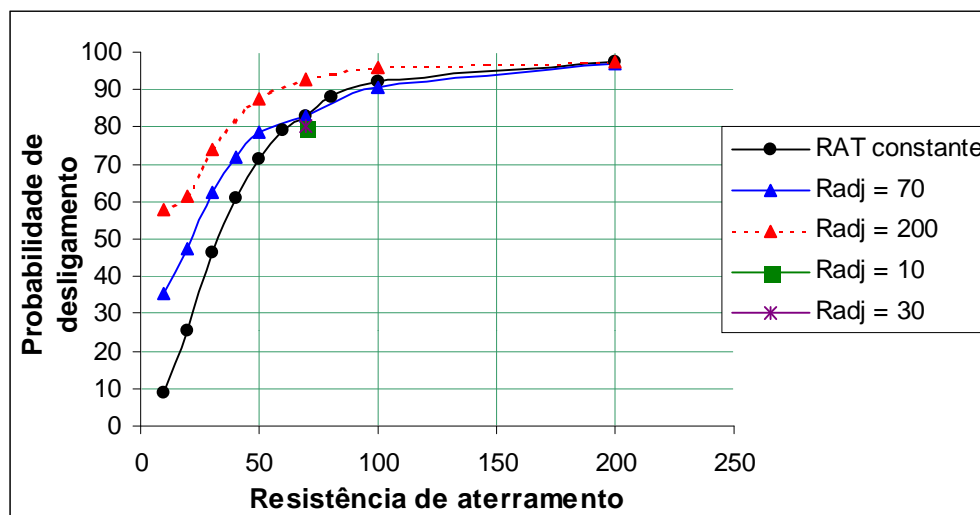
Verifica-se na figura que para uma resistência constante RAT ao longo de toda a rede, a probabilidade de ocorrência de uma descarga disruptiva de retorno aumenta com o aumento dessa resistência. Por outro lado, no caso da existência de resistências RAT na estrutura atingida pela descarga (neste caso

considera-se a impedância de aterramento) e  $R_{adj}$  nas estruturas adjacentes verifica-se, para um valor  $RAT$  constante, um aumento na probabilidade de ocorrência de descargas disruptivas de retorno para maiores valores de  $R_{adj}$ . Para valores de resistência superiores a  $120 \Omega$ , a probabilidade de disrupção está em torno de 100%.

As informações obtidas na figura indica a necessidade de se considerar para linhas com cabos pára-raios e com tensões nominais até 69 kV a instalação de pontos de aterramento em todas as estruturas.



**Figura VI.13- Número de desligamentos de uma linha de transmissão em função da impedância de aterramento (vão médio de 420 m)**



**Figura VI.14 - Efeito do sistema de aterramento na probabilidade de disrupção da isolação**

### **VI.2.2.3 Efeito das descargas atmosféricas em caso de falha de blindagem de linhas protegidas com cabos pára-raios**

Neste caso o condutor fase será atingido diretamente pela descarga atmosférica, sendo o efeito idêntico ao de uma descarga direta incidindo sobre um sistema sem cabo pára-raios. A probabilidade de falha da blindagem depende do ângulo de blindagem entre o cabo pára-raios e os condutores fase e da intensidade da corrente de descarga atmosférica. Falhas na blindagem são mais prováveis para maiores ângulos de blindagem e correntes de descarga de baixa intensidade.

No caso de linhas de transmissão, falhas indesejáveis ocorrem normalmente no meio de vãos de grande extensão entre torres, como no caso de travessias de vales, rios e estradas, quando o afastamento do plano do solo em relação aos condutores deixam esses menos protegidos em relação às descargas atmosféricas laterais /15/. Neste caso, o condutor fase poderá ser atingido diretamente pela descarga atmosférica, sendo o efeito idêntico ao verificado sobre uma linha não blindada.

Já as falhas nas proximidades das torres, devido a correntes de descarga de baixa intensidade são previstas no dimensionamento da blindagem, onde os cabos pára-raios são posicionados de forma tal que essas correntes, ao atingirem os condutores, não gerem tensões incidentes suficientes para produzir descarga externa pelas cadeias de isoladores.

### **VI.2.2.4 Tensões induzidas por descargas atmosféricas incidindo nas proximidades das linhas de transmissão e redes de distribuição**

As descargas atmosféricas, ao incidirem nas proximidades de redes aéreas, induzem tensões nos condutores, cujas amplitudes dependem principalmente das características da descarga (amplitude, forma de onda e velocidade de propagação da corrente de retorno), da altura da rede em relação ao solo e da distância do ponto de incidência da descarga em relação à rede, além da configuração da linha (comprimento, geometria, presença de pára-raios, condutor neutro, cabo pára-raios, valor da resistência e distância entre pontos de aterramento, etc.).

As descargas indiretas interagem com o sistema através do acoplamento eletromagnético entre o canal de descarga e os componentes da rede, induzindo sobretensões que podem exceder o nível de suportabilidade da isolamento, acarretando em uma descarga disruptiva. Este tipo de efeito, a despeito de sua menor intensidade em relação às descargas diretas, é de fundamental importância para sistemas de média e baixa tensão, podendo ser desprezado para linhas de transmissão com tensões nominais de 69 kV e acima.

A determinação das tensões induzidas envolve os seguintes estágios /19/:

- Modelagem da corrente de descarga de retorno, ou seja, a definição da distribuição espacial e temporal da corrente ao longo do canal;
- Determinação do campo eletromagnético resultante, a partir do modelo da corrente de descarga;
- Obtenção das tensões resultantes da interação eletromagnética entre o campo eletromagnético e os condutores da rede, através do modelo de acoplamento.

Devido à importância desse fenômeno, vários estudos têm sido realizados com o objetivo de desenvolver um modelo teórico apropriado para a análise computacional das tensões induzidas devido à ocorrência de descargas indiretas. Entre esses podem ser citados os modelos de Chowdhuri – Gross, Liew – Mar e Rusck, analisados em /20, 21/, Agrawal, utilizado em /22/, e o modelo de Rusck Estendido, proposto por Piantini em /21, 23/.

Apesar da complexidade observada nos modelos para o cálculo das tensões induzidas em situações de interesse prático, é possível estimar a ordem de grandeza das tensões induzidas em redes de distribuição e linhas de transmissão a partir de algumas simplificações. Dentro desse contexto, a referência /10/ apresenta a seguinte equação simplificada, deduzida do modelo de Rusck, para a estimativa da amplitude máxima das tensões induzidas em condutores aéreos:

$$V_{\max} = \frac{Z_0 \cdot I_0 \cdot h}{y} \cdot \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{v}{v_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - 0,5 \cdot \left( \frac{v}{v_0} \right)^2}} \right)$$

$V_{\max}$	Amplitude da máxima tensão induzida sobre a rede ou linha (kV <sub>cr</sub> );
$I_0$	Amplitude da corrente de descarga (kA);
$Z_0$	Impedância do canal de ar condutor do arco ( $Z_0 \approx 30 \Omega$ );
$h$	Altura média dos condutores da rede em relação ao nível do solo (m);
$y$	Distância perpendicular entre o ponto de incidência da descarga no solo com a rede (m);
$v$	Velocidade da descarga de retorno (m/s);
$v_0$	Velocidade da luz no vácuo ( $\approx 3 \cdot 10^8$ m/s).

A equação acima é válida para o cálculo das tensões induzidas em uma linha monofásica de comprimento infinito, estendida sobre um solo de condutividade perfeita, devido à ação de uma descarga atmosférica vertical à superfície da terra, com canal de comprimento infinito. Ela é em geral conservativa e não se aplica ao caso de redes aéreas providas de cabos pára-raios, de pára-raios, de transformadores, etc., devendo ser utilizada apenas para fins estimativos.

De modo idêntico ao caso das descargas diretas, se a amplitude de uma sobretensão induzida exceder, em um dado instante, o nível de suportabilidade da isolamento, ocorre uma descarga disruptiva através da isolamento. A probabilidade dessa sobretensão provocar o desligamento da rede está associada à probabilidade da sobretensão provocar a descarga disruptiva na isolamento e a probabilidade dessa interrupção ser seguida pelo arco de potência.

A experiência de campo tem mostrado que as sobretensões induzidas são mais críticas para redes ou linhas de distribuição aéreas com tensões nominais de até 44 kV, sendo geralmente uma das causas principais de desligamentos não-programados verificados nestes sistemas. Para redes com tensões nominais superiores a esse valor, a probabilidade de desligamentos por descargas indiretas é geralmente baixa, sendo esse efeito desconsiderado para sistemas com máxima tensão operativa igual ou superior a 72,5 kV (tensão nominal de 69 kV).

### **VI.3 Referências bibliográficas:**

- /1/ Soares Junior, A., "Modelagem de Linhas de Transmissão para Avaliação de Desempenho Frente a Descargas Atmosféricas", Tese de Doutorado, UFMG - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE , 2001.
- /2/ Schroeder, M.A.O., "Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas: Aplicação às Medições da Estação do Morro do Cachimbo", Tese de Doutorado, UFMG - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE , 2001.
- /3/ Schroeder, M.A.O. Et alii, "Evaluation of Directly Measured Lightning Parameters", V International Symposium on Lightning Protection – SIPDA, São Paulo – Brazil, 17 – 21 May, 1999.
- /4/ De Mesquita, C.R. Et alii, "Monitoramento de Descargas Atmosféricas: Análise dos sistemas Existentes e Aferição do SLT de Minas Gerais", XVI SNTPEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Campinas, 21 a 26 Outubro de 2001.
- /5/ De la Rosa, F. Et alii, "Evaluation of Surge Arresters Protection of electric Power Lines in Mexico", CIGRE International Workshop on Line Surge Arresters and Lightning, Rio de Janeiro, Brazil – April 24-26 1996.
- /6/ Pinto, I.R.C.A. & Pinto Jr. O, "Lightning Distribution in Brazil from 1998 to 2001 Based on LIS Data", International Conference on Grounding and Earthing & 3<sup>rd</sup> Brazilian Workshop on Atmospheric Electricity, Rio de Janeiro – Brazil, November 4-7, 2002.
- /7/ CIGRÉ Working Group 33.01, "Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines", Cigre Publication n<sup>o</sup> 63, October 1991.
- /8/ IEEE Std 1243, "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines", IEEE Power Engineering Society, June 1997.
- /9/ De Franco, J. L. & Piantini, A., "Estudo de Avaliação do Desempenho de Redes de Distribuição frente a Descargas Atmosféricas", Relatório Técnico PFE-001/03, Franco Engenharia Ltda, Março 2003.



- /10/ IEEE Std 1410, "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines", IEEE Power Engineering Society, June 1997.
- /11/ Soares Jr. A., Schroeder M.A.O., Visacro S.F., "Calculation of Transient Voltages in Transmission Lines Caused by Lightning – Combined Electromagnetic Modeling for Tower, Ground and Aerial Cables" Proceedings of IEEE/PES T&D 2002 Latin America, March 2002.
- /12/ Darveniza, M. et alii, "Line Design and electrical Properties of Wood", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS 86, No 11, November 1967.
- /13/ Hurley, J. J., et alii, "Design of Overhead Transmission Lines for Better Lightning Performance", CIGRÉ Paper 33-04.
- /14/ "Transmission Line Reference Book – 345 kV and above", Second Edition, EPRI, Palo Alto, 1982.
- /15/ Dájuz, Ari. Et alii, "Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão", Furnas Centrais Elétricas, Univ. Federal Fluminense/EDUFF, pp. 245-271, 1987
- /16/ Harper, G. E., "Técnicas Computacionales en Ingenieria de Alta tensión", Editora Limusa, 1987.
- /17/ Melo, M. O. B. C. et alii, "Simulação e modelagem de descargas atmosféricas em linhas de transmissão compactas de Alta Tensão", III Encontro Nacional de Engenharia de Alta Tensão – ENEAT, 2000.
- /18/ De Franco J. L., Soares Jr. A., Visacro S.F., "Studies for the Improvement of Transmission Lines Performance", International Conference on Grounding and Earthing & 3<sup>rd</sup> Brazilian Workshop on Atmospheric Electricity, Rio de Janeiro – Brasil, 2002.
- /19/ Nucci, C. A. & Rachidi, F., "Lightning-Induced Overvoltages", IEEE Transmission and Distribution Conference, Panel Session "Distribution Lightning Protection", New Orleans, April, 1999.
- /20/ Piantini, A. & Janiszewski, J. M., "Analysis of Three Different Theories for Calculation of Induced Voltages on distribution Lines due to Nearby Strikes", International Conference on Electricity Distribution – CIRED Argentina'96: Proceedings. Buenos Aires:CIER / ADEERA, Dez. 1996.
- /21/ Piantini, A., "Contribuição ao estudo das tensões induzidas em linhas de distribuição por descargas atmosféricas indiretas", 205 p., Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1991.
- /22/ Nucci, C. A.; Borghetti, A.; Piantini, A.; Janiszewski, J. M. "Lightning-induced voltages on distribution overhead lines: comparison between experimental results from a reduced-scale model and most recent approaches". In: 24<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection (24<sup>th</sup> ICLP), 1998, Birmingham. ICLP: Proceedings. Stafford: Staffordshire University, 1998. v. 1, pp. 314-320.