



**XXII SNTPEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GDS/03  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO - X**

**GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS**

**UMA REVISÃO DO DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO EM EXTRA-ALTA TENSÃO CA  
QUANTO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

**D. Correia (\*), D. Brasil, C. Campinho, L. Montezuma, A. Carvalho  
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico**

**RESUMO**

No sentido de cumprir sua responsabilidade de cuidar para que as linhas de transmissão (LTs) do sistema elétrico interligado brasileiro tenham um padrão mínimo de desempenho, o ONS estabelece requisitos mínimos a serem atendidos por LTs da Rede Básica, bem como atesta a conformidade das LTs em relação aos requisitos.

Por ano, três a cinco LTs de extra-alta tensão são comissionadas no sistema brasileiro e cada uma delas pode vir a ter sua concessão outorgada a diferentes Transmissoras, que podem ter diferentes práticas do projeto. Tendo em vista que tanto os Procedimentos de Rede quanto os editais de leilão não estabelecem metodologia padrão para a avaliação do desempenho de LTs quanto a descargas atmosféricas, e que os resultados obtidos através de diferentes metodologias podem ser muito diferentes, é importante que esteja disponível a todos os envolvidos uma base comum para comparação e análise.

A presente contribuição tem o objetivo de subsidiar a discussão quanto à propriedade de estabelecer uma metodologia e um conjunto de diretrizes, parâmetros e dados a serem utilizados no cálculo do desempenho de LTs quanto a descargas atmosféricas. No sentido de prover uma reflexão no que diz respeito à forma de lidar com o tema no âmbito do processo de concessão de novas LTs, compara diferentes metodologias e avalia se o uso de metodologias simplificadas leva a resultados similares aos obtidos com o uso de metodologias mais complexas. Com base em LTs 500 kV típicas, o artigo apresenta ainda uma análise de sensibilidade dos parâmetros mais influentes. Os resultados obtidos são discutidos e comparados com a estatística do desempenho real do sistema brasileiro.

**PALAVRAS-CHAVE**

Coordenação de isolamento, descarga atmosférica, linha de transmissão

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O estabelecimento de padrões de desempenho para a Rede Básica é uma das atividades chave do ONS, no que concerne à administração da transmissão. De forma a assegurar o atendimento a tais padrões, requisitos mínimos gerais são impostos às funções da Rede Básica, particularmente a LTs. Além dos requisitos gerais estabelecidos no Módulo 2 dos Procedimentos de Rede [1], requisitos específicos relativos a determinada instalação podem ser incluídos no Anexo Técnico do Edital de Leilão. De sorte a comprovar que os requisitos são atendidos, a concessionária ganhadora do leilão deve apresentar um projeto básico da LT que inclui a definição da configuração da cabeça da torre (ângulo de blindagem e geometria), isolamento, sistema de aterramento preliminar etc.

Além disso, a concessão de cada nova LT é feita a empresa de objetivo específico, o que leva a grande diversidade de empresas. Devido ao fato de que os requisitos funcionais são metas de desempenho e não

(\*) Endereço: Rua da Quitanda, 196 – CEP 20.091-005 Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
Tel: (+55 21) 2203-9690 – Fax: (+55 21) 2203-9420 – Email: delmocorreia@ons.org.br

estabelecem a metodologia e parâmetros a serem utilizados pelas concessionárias, e ainda devido à diversidade de concessionárias, é de fundamental importância que o ONS disponha de metodologia consagrada e aceita por todos os envolvidos para a quantificação do desempenho de LTs quanto a descargas atmosféricas.

Publicações como o Guia Cigré de 1991 [2] são uma importante referência que deve ser levada em conta na análise do desempenho de LTs quanto a descargas atmosféricas. Entretanto, como um Guia, o documento não tem o objetivo de recomendar metodologia, parâmetros e simplificações.

## 2.0 - REQUISITOS MÍNIMOS

Os Procedimentos de Rede, bem como o Anexo Técnico do Edital de Leilão estabelecem os seguintes requisitos, no que se refere ao desempenho de novas LTs CA em extra-alta tensão: a quantidade de desligamentos por descarga atmosférica deve ser igual ou inferior a um ou dois por 100 km por ano, respectivamente para LTs de tensão superior ou igual a 230 kV; e as estruturas devem ser projetadas com no mínimo dois cabos para-raios, posicionados de forma a que a taxa de falha de blindagem seja inferior a  $10^{-2}/100/\text{ano}$ .

## 3.0 - PARÂMETROS BÁSICOS E CASO DE REFERÊNCIA

### 3.1 Dados da LT

A configuração do caso base é uma LT 500 kV com as principais características mostradas na Figura I.

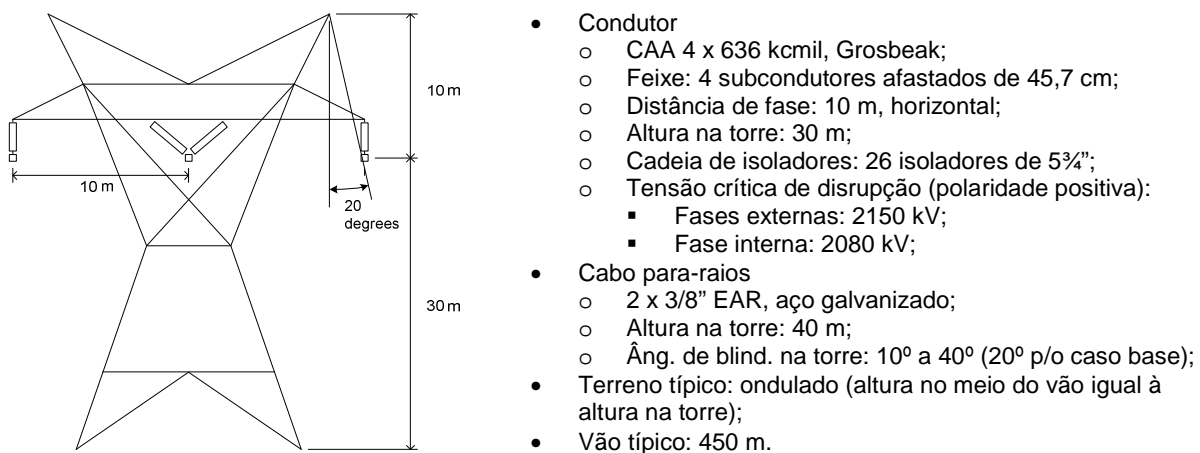


FIGURA I: GEOMETRIA DA LT 500 kV DE REFERÊNCIA

### 3.2 Dados relativos à Descarga Atmosférica

Foi assumida uma densidade de 10 descargas para a terra por km<sup>2</sup> por ano, tendo sido considerada apenas a primeira descarga de polaridade negativa, que foi representada como mostrado na Figura II. Considerou-se que o desempenho estatístico de uma descarga atmosférica possa ser representado por uma distribuição log-normal, de parâmetros (amplitude e frente de onda) listados na Tabela I. Para o caso base, foi utilizada a distribuição da Cigré [2] e foi feita uma análise de sensibilidade com diferentes fontes de referência, também indicadas na mesma tabela.

### 3.3 Modelo eletro-geométrico – Distância de atração

O modelo eletro-geométrico [4][8][9] estabelece que a descarga atmosférica atinja o cabo para-raios, condutor ou terra a partir de um espaçamento denominado distância de atração, como representado na Figura III. A distância de atração é uma função da carga da nuvem e da corrente de descarga, e pode ser aproximada por uma distribuição normal de média  $rs = rs_{50\%} = 10I^{0.65}$  e desvio-padrão  $\sigma \cong 10\%$ , com  $rs$  em (m) e  $I$  em (kA). No caso base, adotou-se a mesma expressão para o valor de  $rs$  para cabos condutor e para-raios:

$$rs = (1 - \sigma) 10I^{0.65} = 9 I^{0.65}$$

Como sensibilidade, utilizou-se diferentes valores de  $rs$  para cabos condutor e para-raios [2]:

$$rs_c = 7.1 I^{0.75}; \quad rs_g = 6.4 I^{0.75}$$

### 3.4 Tensão do topo da torre

A tensão de topo de torre devido a uma descarga nos cabos para-raios foi calculada de acordo com o modelo e parâmetros apresentados na Figura IV. A grandeza  $V_{top}$  em função da impedância de aterramento é apresentada na Figura V, para descarga atmosférica na torre ou no meio do vão. Quanto mais curta a frente de onda, maior a tensão no topo da torre. Descargas na torre são também mais críticas (maior  $V_{top}$ ) do que no meio do vão.

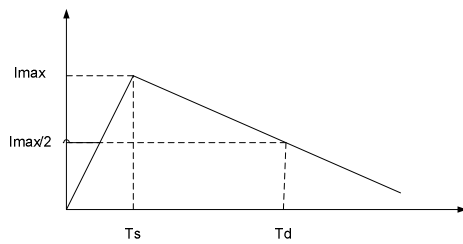


FIGURA II: CORRENTE DE DESCARGA ATMOSFÉRICA

$$T_s = \frac{I_{\max}}{di/dt}$$

$$T_d = 25\mu s$$

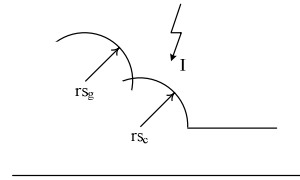
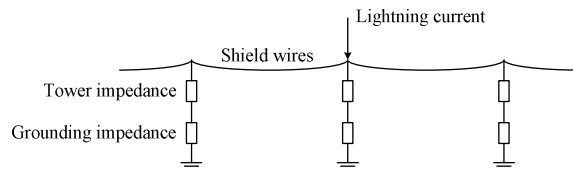


FIGURA III: MODELO ELETRO-GEOMÉTRICO

TABELA I – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DA CORRENTE DE DESCARGA ATMOSFÉRICA

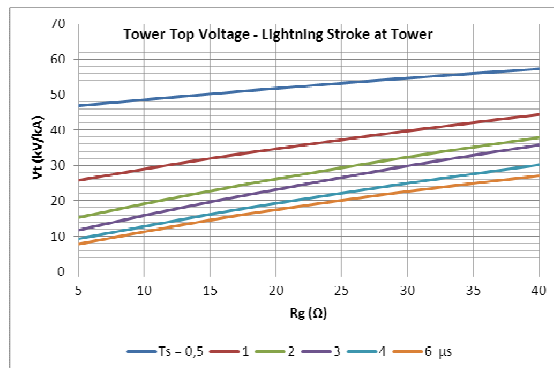
	Distribuição da amplitude			Distribuição da frente de onda		
	I50% (kA)	I16% (kA)	$\beta$ (*)	(di/dt)50% (kA/ $\mu$ s)	(di/dt)16% (kA/ $\mu$ s)	$\beta$ (*)
Cigré – BF [2]	33,3	61	0,605	24,3	44,2	0,599
Cigré – SF [2]	61,1	231	1,330	24,3	44,2	0,599
Popolansky [3]	25	61	0,892	5	34	1,917
Cianos Pierce [4]	20	50	0,916	22	44	0,693
Berger [5]	28	60	0,762	12	24	0,693
Morro do Cachimbo [6]	45	71,3	0,460	9,3 (**)	12,6	0,300

(\*)  $\beta = \ln(V50\%/V16\%)$ ; (\*\*) Distribuição S30

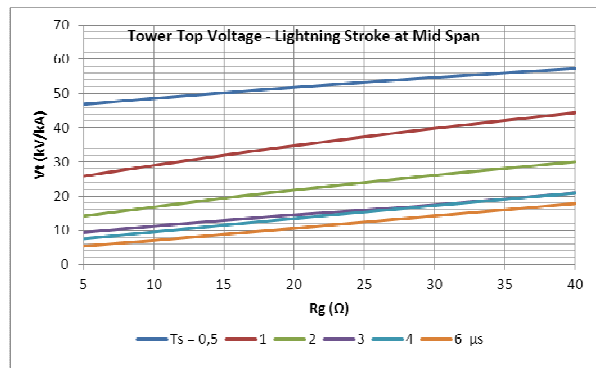


Impedância de surto da torre: 150  $\Omega$ ;  
Impedância de surto do cabo para-raios: 590  $\Omega$ ;  
Impedância de aterramento: 5 a 40  $\Omega$ .

Figura IV: Modelo de cálculo da tensão do topo da torre



(A)



(B)

Figura V: Tensão do topo da torre para descarga atmosférica na torre (A) e no meio do vão (B)

#### 4.0 - RESULTADOS OBTIDOS COM O USO DE DIFERENTES METODOLOGIAS

##### 4.1 Metodologia simplificada – FLASH

Desde os anos cinquenta, têm sido publicados artigos relativos ao desempenho de LTs quanto a descargas atmosféricas [2]. Foi utilizado no presente trabalho o programa FLASH [10], em sua versão 1.9.

##### 4.2 Metodologia probabilística

Os resultados obtidos com o uso do FLASH foram comparados com os obtidos com o uso de um software desenvolvido pelos autores nos anos setenta quando do projeto do sistema 765 kV de transmissão de Itaipu [11][12][13][14][15].

As taxas de falha de blindagem e de descarga indireta previstas foram calculadas estatisticamente através do método de Monte Carlo, como descrito simplificada abaixo.

a) Uma intensidade de corrente de descarga atmosférica é gerada aleatoriamente;

- b) Para determinada largura de faixa da LT, é gerado aleatoriamente um ponto de ataque;
- c) Para a corrente fixada em (a), é estabelecido o modelo eletro-geométrico;
- d) A exposição dos cabos condutor, para-raios ou terra é determinada aleatoriamente, levando em conta o ângulo de incidência da descarga atmosférica em relação à vertical;
- e) Se é atingido um cabo condutor, é calculada a solicitação ao isolamento, considerando intensidade de corrente e impedância de surto do cabo; amplitude e fase da tensão de operação podem ser geradas aleatoriamente;
- f) Se é atingido um cabo para-raios:
  - São gerados os seguintes parâmetros a partir da distribuição de probabilidade: frente de onda da corrente de descarga; localização do ponto de ataque da descarga ao longo do vão; e impedância de aterramento.
  - A partir das grandezas intensidade da corrente de descarga, frente de onda, impedância de aterramento e ponto de ataque, é obtida a tensão do topo da torre previamente tabulada;
  - Levando em conta o fator de acoplamento entre cabos condutor e para-raios, corrigido pela variação do diâmetro do cabo devido a corona [16], obtém-se a solicitação ao isolamento; amplitude e fase da tensão de operação podem ser geradas aleatoriamente;
- g) A solicitação é comparada com a suportabilidade, que pode ser tratada deterministicamente, sendo considerada constante e igual à tensão crítica de disrupção CFO (*critical flashover voltage*) ou estatisticamente; a convolução entre solicitação e suportabilidade indica se houve disrupção do isolamento de uma ou mais fases;
- h) Depois de repetir o processo uma quantidade de vezes suficientemente grande para permitir a representação estatística adequada do fenômeno, é determinada a quantidade de desligamentos ponderada pela estatística de descarga atmosférica, o que leva à obtenção da taxa de desligamento por falha de blindagem – SFR (*shielding failure rate*) e da taxa de desligamento por descarga indireta – BFR (*back flashover rate*).

### 4.3 Resultados

#### 4.3.1 Taxa de falha de blindagem – SFR

A Figura VI apresenta os resultados relativos à SFR do caso base, em função do ângulo de blindagem, mantendo constante a distância vertical entre cabos na torre. A influência da formulação utilizada para a distância de atração é mostrada para o caso base, com  $rs_c = rs_g = rs = (1 - \sigma) 10 I^{0.65} = 9 I^{0.65}$  e para a análise de sensibilidade, com  $rs_c = 7.1 I^{0.75}$  e  $rs_g = 6.4 I^{0.75}$ . Os resultados obtidos com FLASH 1.9 são também indicados.

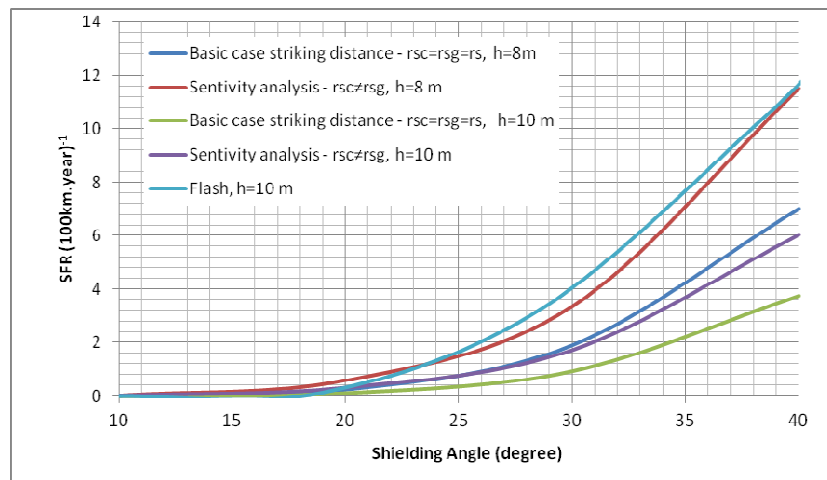


FIGURA VI: SFR BLINDAGEM EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE BLINDAGEM NA TORRE, PARA DIFERENTES FORMULAÇÕES DA DISTÂNCIA DE ATRAÇÃO

Observa-se que os resultados podem variar substancialmente em função da metodologia e parâmetros utilizados. Por exemplo, a SFR varia quase uma ordem de grandeza (de 0.8 a 4) para uma variação de 30° no ângulo de blindagem. Por sua vez, SFR de 0.4/100 km/ano pode ser alcançada para ângulo de blindagem entre 18° e 27°.

A Tabela II apresenta a influência de alguns parâmetros na SFR, considerando constantes os seguintes:

- Ângulo de blindagem: 30°;
- Distância vertical entre condutor e cabo para-raios na torre: 10 m;
- Distância de atração do caso base: ( $rs = 9 I^{0.65}$ ).

#### 4.3.2 Taxa de descarga indireta – BFR

A Tabela III apresenta os resultados referentes à BFR do caso base, em função da impedância de aterramento, para ângulo de blindagem de 20° e distância vertical entre cabos condutor e para-raios na torre de 10 m e as distribuições da amplitude e frente de onda da descarga atmosférica do Cigré Guide/BF [2]. Considerou-se que todas as descargas tenham atingido a torre.

TABELA II – TAXA DE FALHA DE BLINDAGEM PARA DIFERENTES PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DE DESCARGA ATMOSFÉRICA

Caso	Expoente da distrib. do ângulo com a vert. da desc. atmosférica	Distrib. da amplitude de desc. atmosférica	Qt. de deslig. da fase externa por 100 km por ano
1	2	Cigré/SF	0.919
2	0.5	Cigré/SF	0.984
3	3	Cigré/SF	0.891
4	4	Cigré/SF	0.872
5	2	Popolansky	0.774
6	2	Cianos Pierce	0.914
7	2	Berger	0.671

TABELA III – BFR EM FUNÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO

Resistência de aterramento ( $\Omega$ )	Número de desligamentos por 100 km por ano				
	Fases externas	Fase interna	Duplo	Triplo	Desligamento da LT
5	0.0108	0.0048	0.0018	0	0.014
10	0.0258	0.0054	0.0042	0	0.027
15	0.084	0.017	0.012	0	0.089
20	0.337	0.058	0.035	0.001	0.358
30	1.418	0.368	0.353	0.030	1.373
40	3.253	0.905	0.814	0.231	2.882

A Figura VII apresenta uma análise de sensibilidade da influência distribuição estatística da amplitude e frente de onda da descarga. Também estão indicados os resultados obtidos com o programa FLASH 1.9.

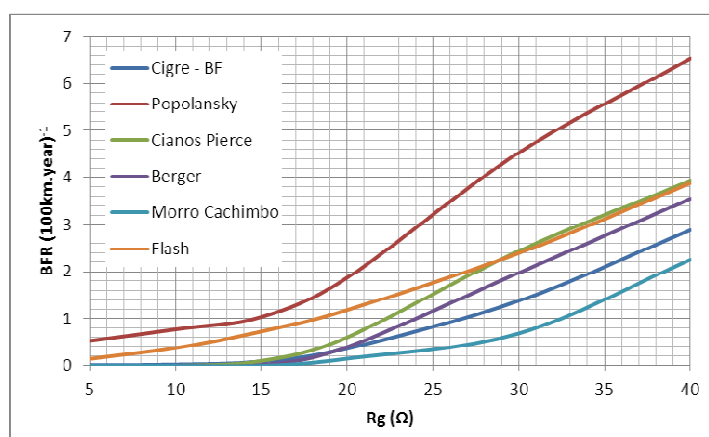


FIGURA VII: BFR EM FUNÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO, PARA DIFERENTES DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS DA AMPLITUDE E FRENTE DE ONDA DA CORRENTE DE DESCARGA ATMOSFÉRICA

Observa-se que os resultados podem variar substancialmente com a metodologia e parâmetros utilizados. Por exemplo, a BFR varia quase uma ordem de grandeza (de 0.7 a 4.5) para impedância de aterramento de 30  $\Omega$ . Além disso, BFR de 1/100 km/ano pode ser alcançada para impedância de aterramento entre 15  $\Omega$  e 33  $\Omega$ .

A Tabela IV apresenta a influência de alguns parâmetros na BFR, considerando constantes os seguintes:

- Ângulo de blindagem: 20°;
- Distância vertical entre cabos condutor e para-raios na torre: 10 m;
- Distribuição da amplitude e frente de onda da descarga atmosférica: Cigré Guide/BF [2];
- Impedância de aterramento: 40  $\Omega$ ;
- Distância de atração do caso base: ( $rs = 9 I^{0.65}$ ).

O caso 1 é o caso base, com ângulo de incidência do raio com a vertical segundo uma distribuição estatística com expoente 2. O caso 2 considera expoente 4 e consequentemente apenas descargas verticais, o que significa maior incidência no cabo para-raios e aumento da BFR (em torno de 30%). O caso 3 refere-se aos resultados obtidos com a suportabilidade do isolamento fase-terra representada estatisticamente por uma distribuição normal de desvio-padrão igual a 3%. Pode-se observar pequena influência na BFR (em torno de 2%). O caso 4 leva em conta uma probabilidade de 40% de que o raio atinja o meio do vão e 60% as torres. Como a sobretensão nas torres é inferior caso o raio tenha atingido o meio do vão, especialmente para frente de onda inferior a 3  $\mu$ s, os resultados mostram redução significativa (em torno de 20%). O caso 5 considera impedância de aterramento modelada como mostrado na Figura VIII [17], com os parâmetros indicados na mesma Figura.

TABELA IV – BFR PARA DIFERENTES PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DA DESCARGA ATMOSFÉRICA

Caso	BFR (100km.ano) <sup>-1</sup>
1 - Caso base	2.882
2 – Exp. da distr. do ângulo da descarga atmosférica com a vertical igual a 4	3.781
3 - Suportabilidade do isolamento – distribuição normal de desvio-padrão de 3%	2.938
4 - 60% das descargas atingem a torre e 40% o meio do vão	2.311
5 - Representação da impedância de aterramento	4.351

A resposta do modelo a um degrau é dada por  $Z(t) = Rd + (Z_0 - Rd) e^{-\frac{tv}{2\ell}}$ .

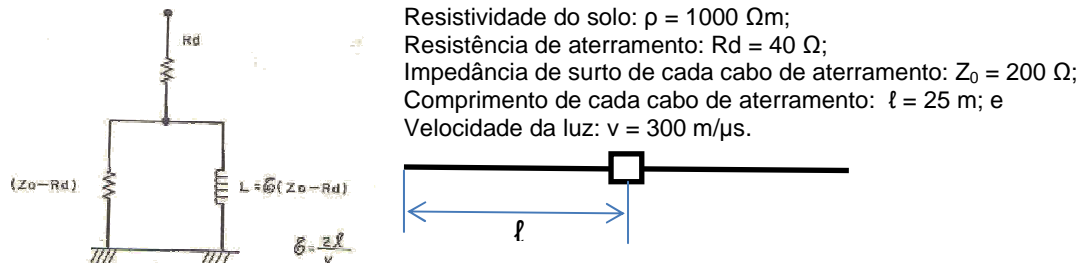


FIGURA VIII: MODELO DO ATERRAMENTO DA TORRE

O significativo aumento na quantidade de saídas (em torno de 80%) pode ser atribuído à resposta da impedância de aterramento da torre, que leva a tensões superiores às causadas pela resistência de dispersão, especialmente para frentes de onda ingremes (até  $4 \mu\text{s}$ ).

## 5.0 - LEVANTAMENTO DO DESEMPENHO ESTATÍSTICO

### 5.1 Base de dados

Há mais de uma década, o ONS tem analisado projetos básicos e coletado informações de confiabilidade dos elementos do sistema tais como LTs, transformadores etc. Todos os distúrbios (saídas forçadas, faltas etc.) são reportados pelas concessionárias e classificados de acordo com uma estrutura acordada previamente com o ONS. Todas as saídas, monopolares ou tripolares, foram incluídas na estatística. Foram computadas inclusive saídas eliminadas por religamento em tempo inferior a um minuto. Operações intencionais de chaveamento para alteração da topologia do sistema não estão consideradas na presente estatística. Pode-se tomar como exemplo a desconexão de uma LT para controle de tensão ou a de uma unidade geradora para controle de carga.

### 5.2 Universo

Para o propósito da presente análise, foram escolhidos dados compreendidos entre 2002 e agosto de 2011. Ao longo desse período de análise, saídas indeterminadas representam 24% do total.

### 5.3 Estatística

Em média, 26% das LTs 500 kV apresentaram ao menos um desligamento devido a descargas atmosféricas, sendo que anualmente esse valor varia de 22% a 30%. Do total de saídas, 18% foram, em média, atribuídas a faltas devidas a descargas atmosféricas (12.4% a 21.9% anualmente). A Figura IX mostra a média do desempenho das LTs 500kV quanto a descargas atmosféricas e os requisitos.

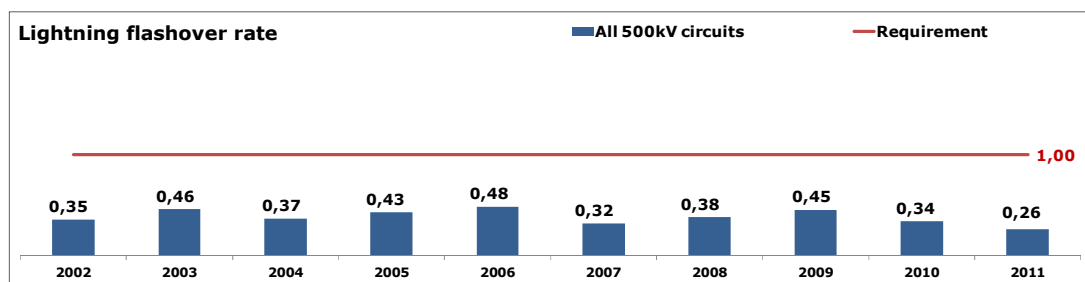


FIGURA IX: DESEMPENHO MÉDIO DAS LTs 500kV QUANTO A DESCARGA ATMOSFÉRICA

A densidade e a distribuição de probabilidade da taxa de falha por descarga atmosférica para o período compreendido entre janeiro de 2002 e agosto de 2011 são mostradas na Figura X, onde se distingue três conjuntos: todas as LTs 500 kV e LTs 500 kV comissionadas antes e depois de 2000. Um resumo dos resultados é apresentado na Tabela V. Apenas 8.9% de todas as LTs 500 kV não atenderam aos requisitos. Para o conjunto de LTs comissionadas antes e após 2000, respectivamente 6.5% e 10.9% não atenderam aos requisitos, o que pode indicar que o projeto de LTs no passado era mais conservativo que atualmente.

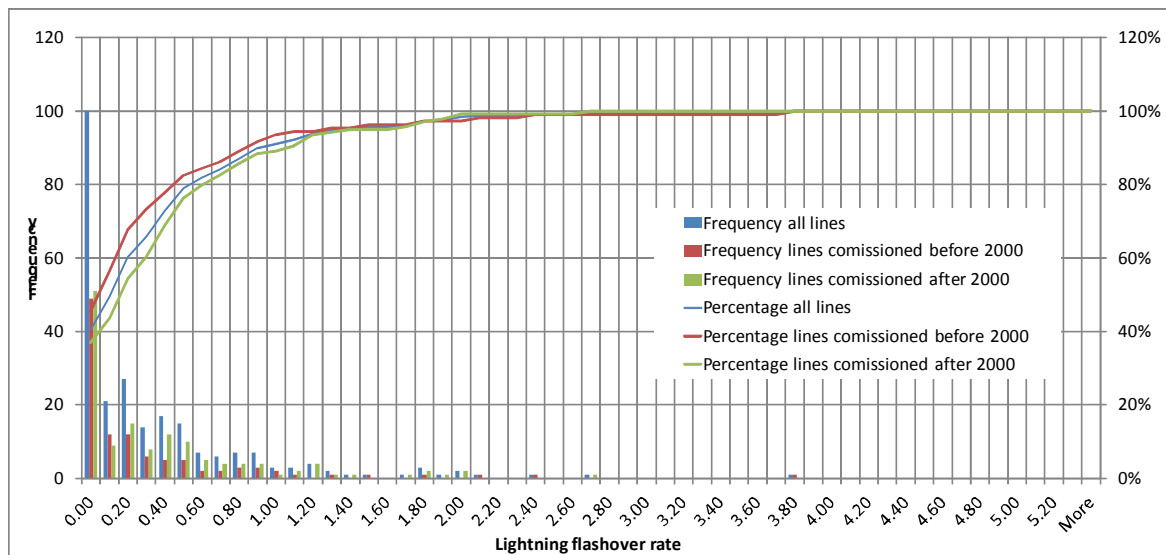


FIGURA X: DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DO DESEMPENHO DE LTs 500 KV QUANTO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

TABELA V – DESEMPENHO DE LTs 500 kV QUANTO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Descrição	Todas as LTs	LTs ant. 2000	LTs post. 2000
Quantidade de LTs	246	108	138
LTs que não sofreram desligamento devido a descarga atmosférica	100 (40.7%)	49 (45.4%)	51 (37.0%)
LTs que atenderam aos requisitos quanto a descargas atmosféricas	224 (91.1%)	101 (93.5%)	123 (89.1%)
LTs que não atenderam aos requisitos quanto a descargas atmosféricas	22 (8.9%)	7 (6.5%)	15 (10.9%)

## 6.0 - MAPA DE DENSIDADE DE DESCARGA

A Figura XI mostra o mapa de densidade de descarga atmosférica nuvem-solo para o território brasileiro, gerado dos dados de pulso de luz capturados do espaço por LIS a bordo dos satélites TRMM no período compreendido entre 1998 e 2009 [19]. Os dados brutos de descarga foram tratados para considerar o seguinte: taxa de amostragem do sensor para diferentes pontos da superfície da terra, uma vez que o TRMM não é geoestacionário; variação da eficiência de detecção do sensor devido ao fato de ser dia ou noite; distorção do pulso de luz causada por efeitos geomagnéticos; e proporção média de eventos nuvem-solo em relação ao total de eventos registrados pelo LIS, já que o sensor não é capaz de distinguir descargas nuvem-solo e intranuvens. Essa proporção foi estimada a partir da rede de detecção de superfície (BrasilDat).

Foi plotada uma rede composta de células de resolução de 25 km x 25 km, que contém a densidade media anual. Os valores plotados no mapa foram calculados com a aplicação de GIS – *Geographic Information System*, que usa métodos numéricos de interpolação IDW – *Inverse Distance Weighted*, baseados nos valores médios anuais. O mapa contém uma escala de cores com dez valores. Valores de densidade abaixo de 0.5 ou acima de 17 descargas por km<sup>2</sup> por ano são representados respectivamente em malva e vermelho. Valores intermediários são representados por cores intermediárias da paleta. Esse mapa, que foi elaborado pelo INPE com o suporte do ONS, está disponível no site do ONS e pode se tornar uma referência para futuros projetos de LTs.

## 7.0 - CONCLUSÕES

As simulações mostram que os resultados obtidos por meio de diferentes metodologias e parâmetros podem ser muito diferentes. Por exemplo, para o exemplo considerado, mantendo-se fixo o ângulo de blindagem em 30° ou a impedância de aterramento em 30 Ω, respectivamente SFR e BFR podem variar quase uma ordem de grandeza, dependendo do processo de cálculo selecionado. Por outro lado, focando a simulação no atendimento aos requisitos de projeto estabelecidos nos anexos técnicos dos editais de licitação ou nos procedimentos de rede, dependendo da metodologia e parâmetros escolhidos, pode-se chegar a uma LT com ângulo de blindagem variando em torno de 10° e impedância de aterramento variando em torno de 20 Ω. Portanto, com adequada seleção de metodologia e parâmetros, é quase sempre possível comprovar a conformidade do projeto básico com os requisitos.

Os parâmetros mais importantes referem-se à representação do ambiente, feita através de dados como resistividade do solo e densidade de descarga atmosférica, incluindo sua discretização em parâmetros simples como frente de onda e amplitude. É importante enfatizar que a definição dos dados ambientais é responsabilidade



da concessionária. Por exemplo, atualmente o projeto básico é feito antes que se disponha de levantamento da resistividade da região, o que em alguns casos tem se mostrado fonte de problemas na fase de operação da linha, pois a resistividade assumida no projeto é inferior à efetivamente verificada.

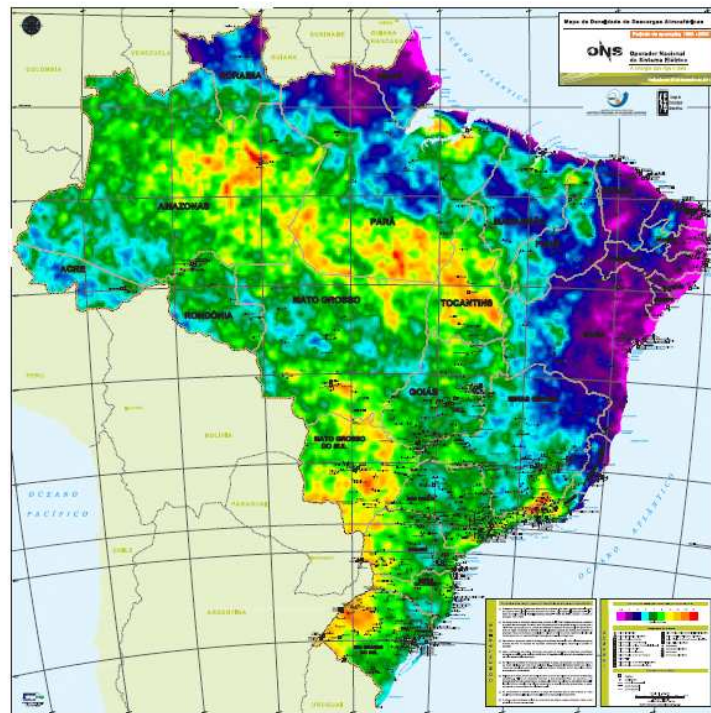


FIGURA XI: MAPA DE DENSIDADE DE DESCARGA ATMOSFÉRICA NUVEM-SOLO

O mapa de densidade de descargas atmosféricas desenvolvido pelo INPE com o apoio do ONS representa um esforço no sentido da homogeneização. Pesquisas quanto aos processos de desenvolvimento das descargas atmosféricas intranuvens e nuvem-solo são muito bem vindas. Também é importante prosseguir no levantamento da densidade de descargas atmosféricas no Brasil, onde há locais com níveis bastante elevados.

Do ponto de vista da metodologia, os autores entendem que é recomendável que o Guia da Cigré [2] seja revisado, levando em conta recentes avanços do tema e incluindo recomendações. Isso traria segurança regulatória e competitiva ao setor, no sentido de homogeneizar metodologias e procedimentos.

Por outro lado, mesmo com tais diferenças na predição do desempenho de LTs quanto a descargas atmosféricas, atribuíveis a metodologia e parâmetros, a estatística de desempenho permite afirmar que, em média, as LTs 500 kV atendem aos requisitos. Outra conclusão é que, entre as LTs que não atendem aos requisitos, há valores muito maiores do que o requisito de 1/100 km/ano. Há LTs com mais de cinco desligamentos por 100 km por ano.

De todas as LTs 500 kV do SIN, 8.9% não atende aos requisitos quanto a descargas atmosféricas. Do conjunto de LTs comissionadas antes de 2000, 6.5% não atende aos requisitos, enquanto que, para as LTs comissionadas após 2000, esse número aumenta para 10.9%, o que pode indicar que o projeto no passado era mais conservativo.

Dados ambientais mais desfavoráveis que o esperado ou a escolha de uma metodologia menos conservativa podem ser citados como possíveis motivos para que o desempenho real seja pior do que o previsto. Qualquer que seja a razão, até o momento, na fase de projeto básico, o ONS não interfere nos valores adotados pelas concessionárias para parâmetros tais como resistividade do solo, resistência de aterramento e densidade de descarga, ou solicita a comprovação por medição.

Embora os resultados mostrem boa conformidade com os requisitos, é recomendável uma discussão mais aprofundada de metodologias de avaliação do desempenho de LTs, visando maior homogeneização da metodologia de cálculo. Além disso, é importante que no mínimo uma estimativa realista dos dados ambientais esteja disponível antes da elaboração do projeto básico.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ONS. "Padrões de desempenho da Rede Básica e requisitos mínimos para suas instalações". Procedimentos de Rede, Submódulo 2.4.
- [2] Working Group 01 (*Lightning*) of SC 33 (*Overvoltages and Insulation Coordination*). "Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines". Cigré Brochure 63, October 1991.



- [3] F. Popolansky. "Frequency Distribution of Amplitudes of Lightning Currents". Electra No. 22, 1972.
- [4] M. Darveniza, F. Popolansky & E. R. Whitehead. "Lightning Protection of UHV Transmission Lines". Electra No. 41, 1974, pages 39-69.
- [5] K. Berger, R. B. Anderson & H. Kröninger. "Parameters of lightning flashes". Electra No. 41, 1975, pp. 23-37.
- [6] S. Visacro, C. R. Mesquita, M. P. P. Batista, L. S. Araujo. "Atualização das Estatísticas de correntes de Descargas Atmosféricas Medidas na Estação Morro do Cachimbo". Paper GDS/13, XXI SNPTTEE, Florianópolis, Brasil, 2011.
- [7] G. W. Brown. "Lightning Performance II – Updating Backflash calculations". IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-97, No. 1, Jan./Feb. 1978, pp. 39-52.
- [8] D. W. Gilmen, E. R. Whitehead. "The Mechanism of Lightning Flashover on High-Voltage and Extra-High-Voltage Transmission Lines". Electra No. 27, March 1973.
- [9] E. R. Whitehead. "Cigré Survey of the Lightning Performance of Extra-High-Voltage Transmission Lines". Electra number 33, pages 63-89.
- [10] IEEE Standard Association. "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines". IEEE Std 1243-1997.
- [11] D. O. C. Brasil, F. M. Resende, J. A. Jardini, A. Vian & M. P. Pereira. "Comportamento a descargas atmosféricas das linhas de transmissão 800 kV de Itaipu". IT RJ/GLT/35, IV SNPTTEE, Rio de Janeiro, 1977.
- [12] M. A. Sargent & M. Darveniza. "The Calculation of Double Circuit Outage Rates of Transmission Lines". IEEE Transaction on PAS, Vol. PAS-86, No. 6, June 1967, pages 665-678.
- [13] J. M. Clayton & F. S. Young. "Estimating Lightning Performance of Transmission Lines". IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-83, Nov. 1964, pages 1102-1110.
- [14] M. A. Sargent. "Monte Carlo Simulation of the Lightning Performance of Overhead Shielding Networks of High Voltage Stations". IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-91, 1972, pages 1651-1656.
- [15] J. R. Currie, L. Ah Choy, M. Darveniza. "Monte Carlo Determination of the Frequency of Lightning Strokes and Shielding Failures on Transmission Lines". IEEE Transactions on PAS, Sept. 1971.
- [16] G. D. MacCan. "The Effect of Corona on Coupling Factor between Ground Wires and Phase Conductors". AIEE, Vol. 62, 1949.
- [17] S. S. Devgan & E. R. Whitehead. "Analytical Models for Distributed Grounding Systems". IEEE Transactions on PAS, 1973, pages 1763-1770.
- [18] R. B. Anderson & A. J. Eriksson. "Lightning Parameters for Engineering Application". Electra number 69, 1980, pages 65-102.
- [19] K. Naccarato, O. Pinto Jr., C. Campinho. "Lightning Density maps obtained by keraunic level, lightning detection network and satellite observation". XI SIPDA, Paper 38, 2011.

## 9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Delmo de Macedo Correia, nascido em 1953 no Rio de Janeiro, é engenheiro eletricitista pela UFF em 1975, mestre em sistemas de potência pela UFPE em 1992 e doutor em eletrotécnica teórica pela Universidade Técnica de Hamburgo em 1998. Membro do CIGRÉ e do IEEE, suas áreas de interesse são qualidade de energia e engenharia de equipamentos. Trabalhou em estudos de engenharia na IESA, Themag e projetos de P&D na UFPE e na USP. Trabalha atualmente no ONS.



Dalton de Oliveira Camponês do Brasil, nascido em São Paulo/SP em 1949, obteve o grau de engenheiro eletricitista pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 1972 e o grau de mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco em 1996. Atualmente trabalha no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) como assessor da Diretoria de Administração dos Serviços de Transmissão.



Leandro Ribeiro Montezuma, nascido no Rio de Janeiro em 1980, graduou-se em Engenharia Elétrica pela UFF em 2005. Em 2011 especializou-se em Proteção de Sistemas Elétricos pela UFRJ e atualmente cursa mestrado em Sistemas de Energia na COPPE/UFRJ. No período de 2005/2009 exerceu o cargo de engenheiro de proteção na Concessionária Ampla e atualmente trabalha no ONS na gerência de estudos especiais, proteção e controle.



Carlos Campinho, nascido em 1962 em Petrópolis, é engenheiro eletricitista formado pela UCP em 1985. Trabalhou como projetista de linhas de transmissão para empresas de consultoria e de construção de linhas de transmissão e como consultor para o PNUD dentro do Projeto de Eficiência Energética da Eletrobras. Trabalha atualmente no ONS em assuntos relacionados a linhas de transmissão.



Antônio Carlos C. de Carvalho, nascido em 1955 no Rio de Janeiro, é engenheiro formado em 1978 na UFRJ e mestre em sistemas de potência pela COPPE/UFRJ (1984). É membro do CIGRE e é especializado na interação equipamentos-rede. Trabalhou com P&D no CEPEL e em desenvolvimento de equipamentos na ABB. Atualmente ocupa a Gerência de Padrões de Desempenho e Requisitos mínimos da Rede Básica no ONS.