



ANÁLISE DE METODOLOGIAS E FERRAMENTAS PARA SIMULAÇÕES DE SOBRETENSÕES POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Palavras-Chave: linha de transmissão, descarga atmosférica, transitório eletromagnético

Gustavo Magalhães Pinto Assis [LTRANSP/UNICAMP]

Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares (orientadora) [LTRANSP/UNICAMP]

Dr. Javier Arturo Santiago Ortega (coorientador) [LTRANSP/UNICAMP]

INTRODUÇÃO

A rede de energia elétrica brasileira é formada pelo Sistema Interligado Nacional (SIN) que é responsável por transportar a energia produzida nos centros geradores até as unidades consumidoras através das linhas de transmissão. Devido sua importância estratégica na manutenção do suprimento de energia elétrica, base de qualquer atividade econômica moderna, este deve atender normas técnicas rigorosas para evitar falhas no serviço. No entanto, a grande extensão territorial do país somada às estruturas de elevado porte que constituem os sistemas de transmissão, tornam as linhas um dos elementos do SIN mais expostos à incidência de descargas atmosféricas, uma das principais causas de desligamentos e interrupção no fornecimento de energia no Brasil (NETO *et al.*, 2017).

As descargas são impulsos de corrente de alta frequência e curta duração com magnitude da ordem de milhares de amperes que provocam sobretensões transitórias quando atingem uma linha de transmissão, podendo ultrapassar o nível básico de isolamento dos equipamentos elétricos afetados. Além disso, os parâmetros fundamentais que governam o comportamento da onda impulsiva apresentam caráter extremamente aleatório que somado à dependência da frequência e não linearidade da resposta tensão-corrente dos componentes elétricos do sistema, torna fundamental o desenvolvimento de métodos, ferramentas e modelos especiais para a correta representação do fenômeno. As técnicas utilizadas são específicas para a faixa de frequência de surtos atmosféricos que está compreendida entre 10 kHz a 3 MHz de acordo com a norma IEC 60071 e CIGRE (MARTINEZ-VELASCO; CASTRO-ARANDA, 2020).

É nesse contexto que o presente projeto pretende realizar uma revisão bibliográfica das principais metodologias e práticas de modelagem para análise de sobretensões geradas por impacto de descargas atmosféricas em linhas de transmissão, com o objetivo de implementar os conhecimentos adquiridos em programas de simulação digital, com destaque ao software PSCAD-EMTDC. Embora o fenômeno de interesse tenha forte caráter estatístico quando desenvolvido para estudos de coordenação de isolamento, essa pesquisa irá focar em modelos determinísticos para simulação, porém análises de sensibilidade serão realizadas com a finalidade de avaliar os parâmetros mais relevantes para a resposta transitória do sistema.

METODOLOGIA

A primeira parte da pesquisa consistiu na revisão bibliográfica dos conceitos sobre formação de descargas atmosféricas e todo o processo natural que descreve o fenômeno, utilizando como suporte as referências da literatura (RAKOV, 2007; UMAN, 1987; VISACRO FILHO, 2005). Em seguida foi conduzido um estudo direcionado ao estado da arte das técnicas de modelagem dos elementos do sistema submetidos aos efeitos de transitórios de alta frequência, utilizando orientações e normas técnicas de instituições referência no assunto, com destaque ao IEEE (IEEE STANDARDS BOARD, 1997; IMECE *et al.*, 1996) e CIGRE (CIGRE WG C4.407, 2013), (CIGRE WG01 SC33, 1991) e artigos científicos de congressos especializados na área. Dessa forma, todo o processo de representação computacional do fenômeno para efeito de simulação digital e estudo de coordenação da proteção pode ser resumido de acordo com a Figura 1 (D'AJUZ *et al.*, 1987; EPRI, 2005; MARTINEZ-VELASCO; RAMIREZ; DÁVILA, 2009; MARTINEZ-VELASCO, 2020).

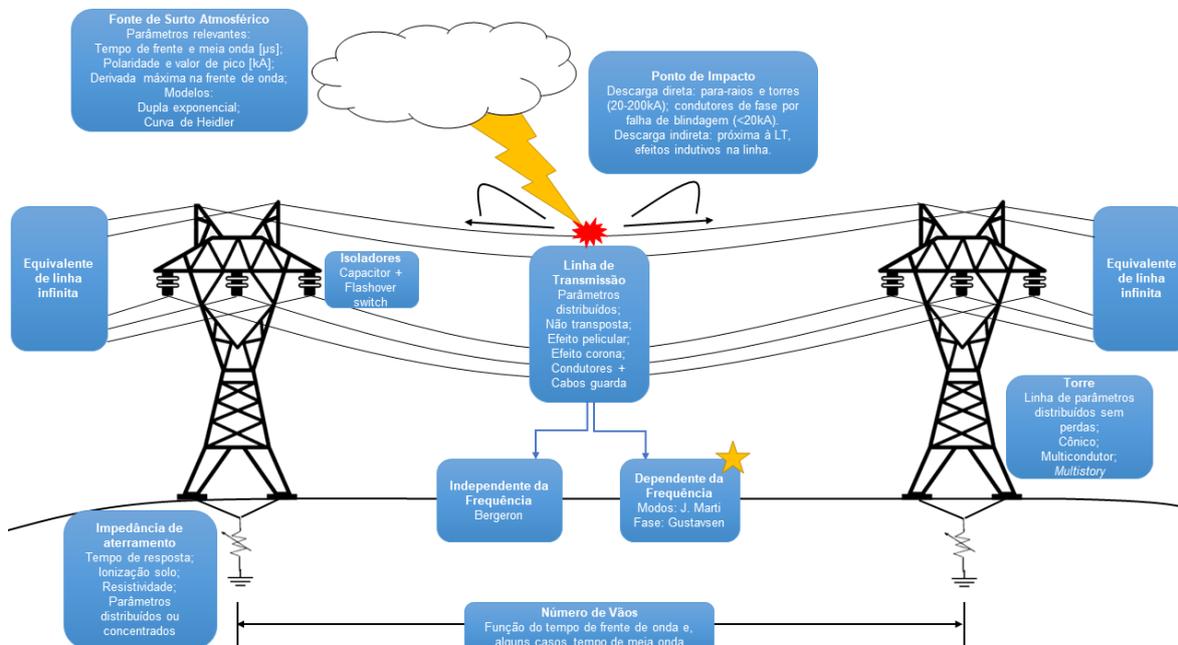


Figura 1 - Resumo dos métodos de modelagem para análise de transitórios gerado por surtos atmosféricos em linhas de transmissão.

A segunda etapa foi dedicada à implementação no PSCAD de estudos de caso para avaliação da resposta dos modelos, junto a testes de sensibilidade para identificar os parâmetros que mais influenciam as sobretensões transitórias. Os testes realizados apenas consideraram incidência do tipo direta, já que o sistema em estudo é de 138 kV (Figura 2). Para este nível de tensão os efeitos indutivos de descargas próximas à linha não são suficientes para ultrapassar o nível básico de isolamento para isoladores (NBI 650kV) (VASCONCELLOS, F. M. DE; MOREIRA, 2017). Os testes conduzidos foram:

1. Comparação entre representações de linha (Modos x Fases);
2. Comparação entre modelos de aterramento (Resistência Não Linear x Parâmetros Concentrados x Parâmetros Distribuídos);
3. Análise de sensibilidade em relação a resistividade do solo (100, 1000 e 5000 $\Omega.m$);
4. Teste do modelo de isolador *Leader Progression*;
5. Variação dos parâmetros da fonte de surto atmosférico;
6. Descarga no meio do vão impactando cabos para-raios no máximo/mínimo da tensão da rede;
7. Descarga no meio do vão nas fases externas (falha de blindagem) no máximo/mínimo da tensão da rede.

Os dados da linha de transmissão utilizados encontram-se apresentados na Tabela 1. Especificamente as torres foram representadas pelo modelo de cintura, como exemplificado em (EPRI, 2005), o aterramento feito por condutor contrapeso aço-cobre 4 AWG enterrado a 60 cm da superfície do solo com 10 m de comprimento e o efeito corona foi desconsiderado. Além disso, a fonte de surto foi implementada pela curva de Heidler (HEIDLER; CVETIĆ; STANIĆ, 1999) com seus parâmetros determinados pelas medições estatísticas feitas na Estação do Morro do Cachimbo (VISACRO *et al.*, 2004) de modo a tornar os resultados mais próximos à realidade brasileira. Também vale ressaltar que todas as simulações foram reproduzidas para uma resistividade de solo de 1000 $\Omega.m$, com exceção da análise de sensibilidade, e que os cinco primeiros testes consideraram uma incidência de descarga atmosférica do tipo direta no topo da torre central representada.

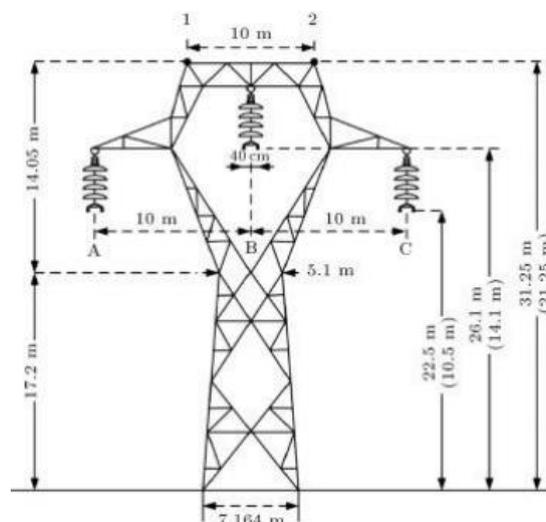


Figura 2 - Silhueta da torre de 138 kV. As medidas entre parênteses são os valores de altura no meio do vão.

Tabela 1 - Parâmetros elétricos e mecânicos da linha e dados do solo.

Nome do Cabo	LINNET	EHS 3/8"
Tipo	CAA	EHS Classe A
Raio Interno [cm]	0,2976	0
Raio Externo [cm]	0,9155	0,476
Resistência CC* [Ω/km]	0,2032	3,81
Comprimento vão [m]	300	
Resistividade do solo [$\Omega.m$]	1000	

(*) Resistências CC corrigidas para temperatura de operação de 75°C e 45°C para condutores e cabos para-raios, respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O teste comparativo de linhas, apresentado na Figura 3, demonstra que a modelagem no domínio das fases obteve um pico de sobretensão na cadeia de isoladores menor do que a representação modal, ainda que a diferença seja de 3.03%. Isso acontece, pois, a abordagem modal é bastante precisa quando se trata de linhas aéreas balanceadas (transpostas) devido à matriz de transformação entre domínios ser considerada constante com a frequência. Nesse caso, a diferença é mínima porque o grau de assimetria (desbalanceamento) das fases dispostas na torre em análise é pequeno.

A Figura 4 apresenta os resultados para as modelagens do aterramento. Nota-se que os parâmetros concentrados resultaram em uma simulação muito mais conservadora e os distribuídos seguiram a mesma linha, porém, com pico atenuado. Essa atenuação vem pela incorporação dos efeitos temporais de propagação da onda na modelagem distribuída e é esperado que a diferença aumente para condutores com comprimento superior a 20 m (MARTINEZ-VELASCO; RAMIREZ; DÁVILA, 2009). Já a resistência não linear obteve a menor das sobretensões por assumir o efeito da ionização do solo no fenômeno, o que pode ser entendido como um decaimento da resistência de terra de acordo com a intensidade da corrente de surto atmosférico. Pode-se verificar que é muito importante utilizar a correta modelagem da ionização do solo.

A análise de resistividade, Figura 5, mostra que o pico da sobretensão está intimamente relacionado às características elétricas do solo, já que este é resultado das reflexões da onda nas torres adjacentes e, principalmente, no sistema de aterramento (IEEE STANDARDS BOARD, 1997). Portanto, quanto menor a resistividade de terra, melhor a capacidade de escoamento da corrente de surto para o solo, garantindo menor elevação do potencial da torre e reduzindo a sobretensão nos isoladores. Vale ressaltar que a resistividade do solo é função de suas características de composição e é dependente da frequência e que os modelos utilizados nessa pesquisa consideram solo homogêneo e resistividade independente da frequência. Novamente deve ser destacado que é essencial efetuar a correta medição da resistividade do solo no traçado da linha de transmissão e que eventual uso de valor típico irá comprometer o desempenho da linha para a ocorrência de desligamentos devido às descargas elétricas.

O teste da Figura 6 teve o objetivo de observar a resposta do modelo *Leader Progression* para os isoladores, uma técnica que considera os aspectos físicos para a criação do canal ionizado que antecede à disrupção da cadeia. Nota-se que as fases externas da linha se mantiveram com nível de tensão superior ao NBI especificado por tempo suficiente para que o curto sobre a cadeia se estabelecesse em 8,71 μs . Já a fase B, devido ao maior acoplamento eletromagnético com as fases vizinhas, possui uma diferença de potencial em relação à torre menor, permanecendo abaixo do NBI durante todo o transitório.

A Tabela 2 apresenta, respectivamente, os resultados dos testes de variação para a corrente máxima, tempo de frente e tempo de cauda da onda, parâmetros fundamentais da fonte de surto atmosférico. Primeiramente, observa-se que o pico de sobretensão é inversamente relacionado com o tempo para a disrupção da cadeia, uma vez que o modelo mencionado anteriormente é baseado na evolução física do canal ionizado de descarga, portanto, dependente da intensidade de campo elétrico local. Além disso, o pico de corrente (Teste 1) está positivamente correlacionado com

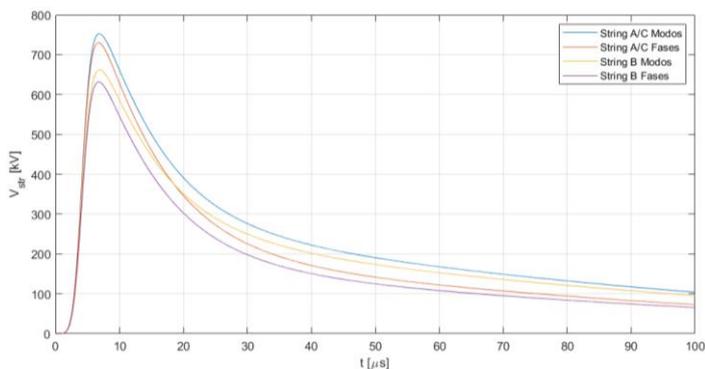


Figura 3 – Tensão sobre os isoladores de cada fase. Teste de linhas.

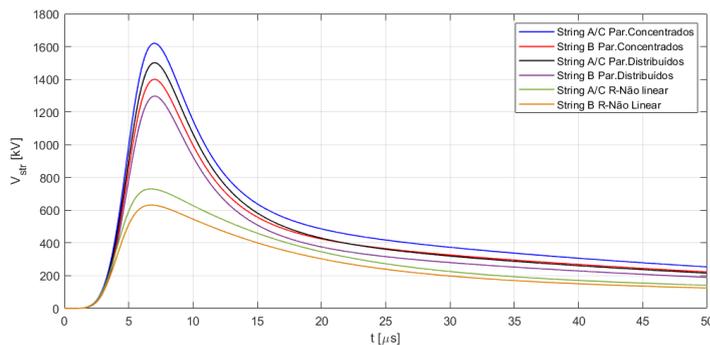


Figura 4 – Tensão sobre os isoladores de cada fase. Teste de modelos de aterramento.

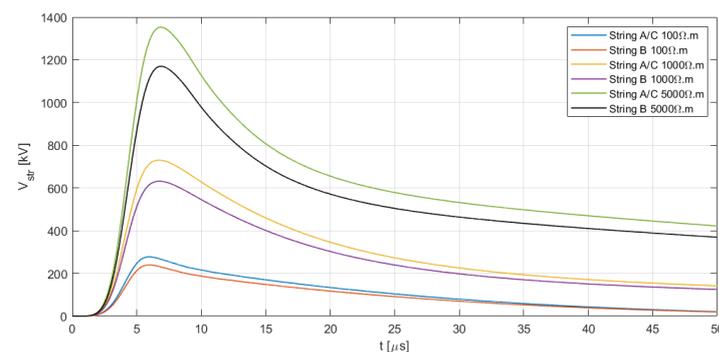


Figura 5 – Tensão sobre os isoladores de cada fase. Análise de resistividade.

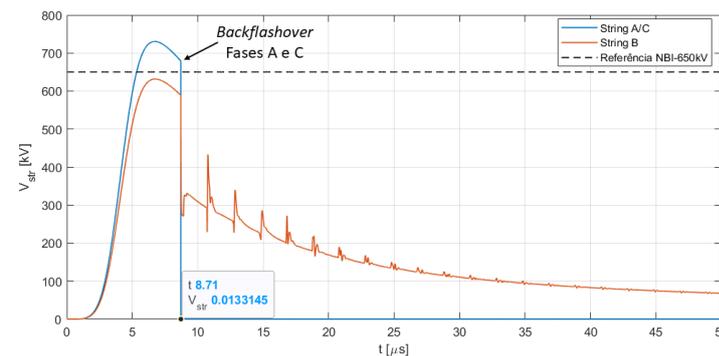


Figura 6 – Tensão sobre os isoladores de cada fase. Análise do modelo *Leader Progression* para isoladores.

o pico de sobretensão e este consiste no parâmetro mais crítico para a proteção de linhas de transmissão contra surtos, pois representa o máximo acúmulo de cargas que é injetado no sistema. O tempo de frente de onda (Teste 2) decresce o pico de sobretensão de acordo com o seu aumento, isso porque a frente de onda está relacionada a fenômenos indutivos na linha, logo uma frente mais rápida produz maior indução nas fases próximas e eleva a diferença de potencial na cadeia de isoladores. Por fim, o tempo de cauda (Teste 3) não tem um efeito significativo no pico de sobretensão, no entanto, em análises relacionadas a efeitos térmicos e energia dissipada pela corrente de descarga, esse parâmetro torna-se fundamental (VISACRO FILHO, 2005).

A Figura 7 apresenta os testes de incidência de descarga no meio do vão impactando o cabo para-raios (A) e fase externa por falha de blindagem (B) no máximo e mínimo da Fase A (referência). No primeiro, podemos afirmar que o ângulo que a tensão de fase se encontra no momento do impacto é relevante no nível da tensão sobre os isoladores, porém ambos os casos não foram suficientes para ocasionar o curto sobre a cadeia. Isso porque a incidência no meio do vão atenua a onda de surto devido à sua propagação pela linha, atingindo a torre adjacente com pico reduzido. Em (B), o estado da rede no momento do impacto não assume a mesma relevância na resposta transitória, já que em casos de falha de blindagem a injeção de corrente na fase atingida produz uma sobretensão elevada, mesmo que, nesses casos, o pico seja inferior a 20 kA (IEEE STANDARDS BOARD, 1997). Esse efeito decorre da alta impedância fase-terra.

Tabela 2 – Máxima sobretensão nos isoladores e tempo mínimo de interrupção para variação dos parâmetros da fonte de surto.

Variação de Parâmetros							
Testes	Teste 1 - Variação Ipico ($\tau_1 = 5,6 \mu\text{s} / \tau_2 = 53,5 \mu\text{s}$)		Teste 2 - Variação τ_1 (Ipico = 45,3 kA / $\tau_2 = 53,5 \mu\text{s}$)		Teste 3 - Variação τ_2 (Ipico = 45,3 kA / $\tau_1 = 5,6 \mu\text{s}$)		
	V _{string} Máximo	35,0 kA	619,0 kV	4,0 μs	800,0 kV 5,865 μs	40,0 μs	735,5 kV 8,525 μs
40,0 kA		674,7 kV	4,2 μs	787,4 kV 6,195 μs	44,0 μs	733,8 kV 8,585 μs	
45,0 kA		727,3 kV 8,815 μs	4,4 μs	776,3 kV 6,530 μs	48,0 μs	732,3 kV 8,640 μs	
50,0 kA		777,5 kV 7,635 μs	4,6 μs	766,5 kV 6,875 μs	52,0 μs	730,9 kV 8,690 μs	
55,0 kA		825,5 kV 7,020 μs	4,8 μs	757,9 kV 7,225 μs	56,0 μs	729,6 kV 8,740 μs	
T _{flashover} Mínimo		60,0 kA	871,7 kV 6,610 μs	5,0 μs	750,2 kV 7,580 μs	60,0 μs	728,4 kV 8,785 μs
		65,0 kA	916,3 kV 6,310 μs	5,2 μs	743,2 kV 7,945 μs	64,0 μs	727,4 kV 8,825 μs
		70,0 kA	959,5 kV 6,075 μs	5,4 μs	736,6 kV 8,320 μs	68,0 μs	726,4 kV 8,865 μs
		75,0 kA	1001,4 kV 5,885 μs	5,6 μs	730,4 kV 8,710 μs	72,0 μs	725,4 kV 8,900 μs
	80,0 kA	1042,2 kV 5,725 μs	5,8 μs	724,4 kV 9,110 μs	76,0 μs	724,6 kV 8,935 μs	

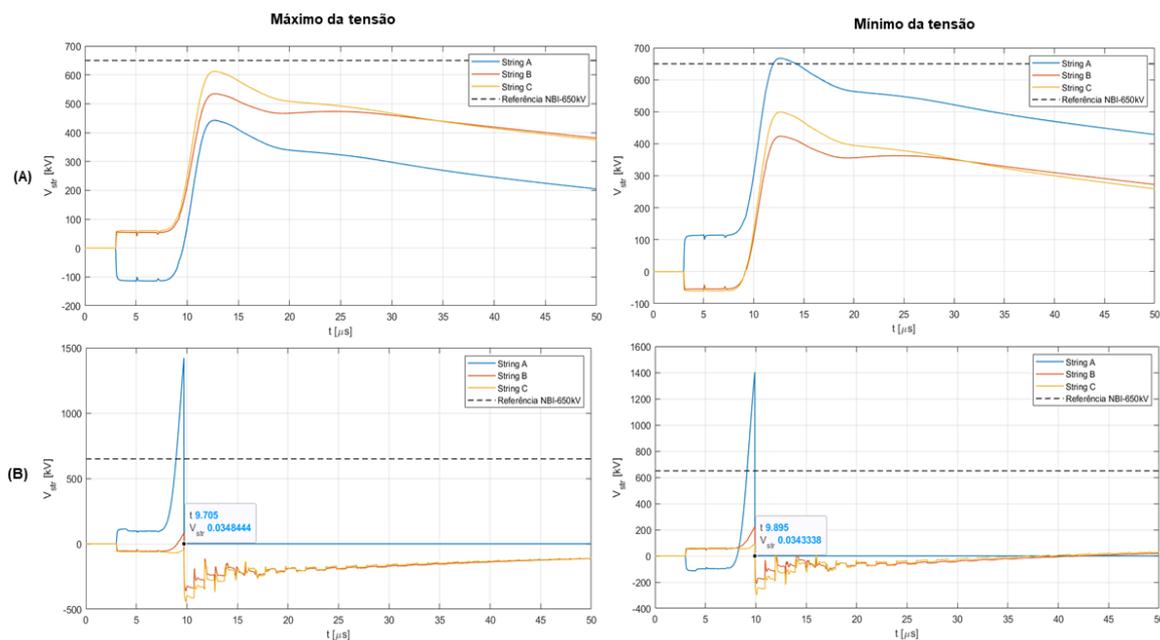


Figura 7 – Tensão sobre os isoladores de cada fase. Teste de incidência no meio do vão.

CONCLUSÕES

As simulações digitais de transitórios de alta frequência apresentam respostas diferentes de acordo com a técnica utilizada e as simplificações incorporadas em cada modelagem, sendo o valor de pico de sobretensão o principal fator a se verificar em um estudo desse tipo, pois este representa a máxima solicitação de tensão que os componentes da linha deverão suportar. No entanto, para as linhas é recomendado utilizar o modelo diretamente no domínio das fases, já que este garante maior abrangência na representação de sistemas de transmissão mais genéricos, como torres com circuitos duplos.

A representação do aterramento se mostrou crítica na resposta transitória, dessa forma deve-se utilizar um modelo mais detalhado e o mais simples possível que atenda o caso de estudo e não produza uma resposta demasiadamente conservadora, para que os recursos de projeto da malha de terra não sejam superdimensionados. Para isso, a inclusão do efeito de ionização do solo se mostrou um item importante na obtenção de uma resposta mais atenuada, porém é válido investigar técnicas que incorporam a resistividade do solo variável com a frequência para estabelecer melhores critérios de escolha entre modelos.

A abordagem do *Leader Progression* para isoladores é uma boa escolha para a representação da evolução do canal ionizado pela cadeia durante o processo de simulação. Além disso, a interrupção desta não ocorre imediatamente quando o NBI é excedido, o que é razoável quando comparado a casos reais e à utilização de fontes de surto atmosférico não padronizadas (MARTINEZ-VELASCO; RAMIREZ; DÁVILA, 2009).

Para estudos reais de desempenho de linhas contra descargas atmosféricas é extremamente recomendado que os parâmetros da forma de onda de surto sejam obtidos de forma estatística considerando o índice cerâmico da região em análise e que o ângulo da tensão referência da rede, no momento de impacto, seja gerado de forma aleatória, devido ao caráter probabilístico intrínseco ao fenômeno (CIGRE WG01 SC33, 1991). Dessa forma, não é possível afirmar um tipo genérico de modelo para os componentes que apresente uma boa resposta em todos os cenários. Portanto, cada representação deve possuir um nível de detalhamento capaz de reproduzir uma resposta coerente nas simulações para o tipo de cenário e considerações estabelecidas.

BIBLIOGRAFIA

CIGRE WG C4.407. **Lightning parameters for engineering applications**. [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/APEMC.2010.5475697>

CIGRE WG01 SC33. Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines. **CIGRE Report 63**, [s. l.], v. 01, n. October, p. 64, 1991.

D'AJUZ, Ary *et al.* **Transitórios elétricos e coordenação de isolamento - Aplicação em sistemas de potência de alta tensão**. Niterói: Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987.

EPRI. **EPRI AC Transmission Line Reference Book - 200kV and Above**. Third Edited. Palo Alto, CA: [s. n.], 2005.

HEIDLER, F.; CVETIĆ, J. M.; STANIĆ, B. V. Calculation of Lightning Current Parameters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 399–404, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/61.754080>

IEEE STANDARDS BOARD. **IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines**. [S. l.]: IEEE, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1997.84660>. Acesso em: 17 fev. 2021.

IMECE, Ali F. *et al.* Modeling guidelines for fast front transients. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 493–506, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/61.484134>

MARTINEZ-VELASCO, J.A.; RAMIREZ, A. I.; DÁVILA, M. Overhead Lines. *In*: MARTINEZ-VELASCO, J.A. (org.). **Power System Transients. Parameter Determination**. [S. l.]: CRC Press, 2009. p. 17–135.

MARTINEZ-VELASCO, Juan A. Modelling of Power Components for Transients Studies. *In*: MARTINEZ-VELASCO, Juan A. (org.). **Transient Analysis of Power Systems: A Practical Approach**. First Edited. [S. l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2020. p. 11–66. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781119480549.ch2>

MARTINEZ-VELASCO, Juan A.; CASTRO-ARANDA, Ferley. Calculation of Power System Overvoltages. *In*: MARTINEZ-VELASCO, Juan A. (org.). **Transient Analysis of Power Systems: A Practical Approach**. First Edited. [S. l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2020. p. 203–274. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781119480549.ch6>

NETO, Sandoval de Araújo Feitosa *et al.* Relatório de Análise - Desempenho da operação nas instalações de transmissão. **ANEEL**, [s. l.], v. 1, p. 1–39, 2017.

RAKOV, V. A. Lightning phenomenology and parameters important for lightning protection. **IX International Symposium on Lightning Protection**, [s. l.], n. November, p. 24, 2007.

UMAN, Martin A. **The Lightning Discharge**. 1st. ed. Gainesville: Academic Press, 1987.

VASCONCELLOS, F. M. DE; MOREIRA, F. A. Avaliação e Dimensionamento de Sistemas de Aterramento para Redução de Desligamentos de Linhas de Transmissão por Backflashover: estudos de caso para uma LT de 138 kV. *In*: , 2017. **12th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE**. [S. l.: s. n.], 2017. p. 10.

VISACRO, Silvério *et al.* Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo station. **Journal of Geophysical Research**, [s. l.], v. 109, n. 1, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2003jd003662>. Acesso em: 5 jan. 2021.

VISACRO FILHO, Silvério. **Descargas Atmosféricas Uma Abordagem de Engenharia**. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2005.