



Grupo de Estudo de Desempenho de Sistemas Elétricos-GDS

Comportamento de linhas de transmissão parcialmente protegidas por dispositivos para-raios frente a descargas atmosféricas

**MATHEUS HENRIQUE ROSA DUARTE(1); RAFAEL ALÍPIO(2); SANDRO DE CASTRO ASSIS(3);
CEFET MG(1); CEFET MG(2); Cemig D(3);**

RESUMO

Este trabalho aborda a influência da instalação de para-raios em apenas algumas fases da torre na proteção de linhas de transmissão frente descargas atmosféricas. Esse impacto é quantificado a partir do levantamento de probabilidades de desligamento por *backflashover* para diversas condições de projeto, variando o sistema de aterramento, número de para-raios instalados na torre, e número de circuitos da linha. A instalação de para-raios em apenas algumas fases aprimora consideravelmente o desempenho da linha frente descargas atmosféricas. Levantou-se ainda a influência do sistema de aterramento, além das diferenças de linhas de circuitos simples e duplo no desempenho frente descargas atmosféricas.

PALAVRAS-CHAVE

Linhas de transmissão, descargas atmosféricas, para-raios, sistemas de aterramento, ATP.

1.0 - INTRODUÇÃO

Linhas de transmissão são ativos fundamentais para o fornecimento de energia, especialmente em um país com dimensões continentais, como o Brasil. É, portanto, fundamental garantir-se a continuidade de operação destes elementos. Neste contexto, descargas atmosféricas constituem-se como a principal ameaça a essa continuidade, especialmente em decorrência de descargas disruptivas de retorno, também denominadas *backflashover* (1).

A fim de melhorar o desempenho de linhas de transmissão frente a esse fenômeno, dispositivos para-raios podem ser utilizados, instalados em paralelo com as cadeias de isoladores da linha, consistindo em uma estratégia eficiente. Não obstante, a instalação de dispositivos para-raios ao longo de toda a linha demandaria massivos investimentos, de forma que estes são usualmente instalados em regiões de elevada densidade de descargas atmosféricas e/ou locais de alta resistividade de solo.

Este trabalho aborda a eficácia da proteção de linhas de transmissão a partir da instalação para-raios em algumas fases da torre de transmissão. Visa-se, a partir de menores investimentos, melhorar o desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas.

Os resultados deste trabalho são decorrentes de simulações no domínio do tempo no ATP (*Alternative Transient Program*). Ressalta-se que o domínio do tempo é apropriado para a simulações de dispositivos com características não lineares, tais como os dispositivos para-raios. São simuladas diversas condições de incidência de descargas, variando-se a intensidade da onda de descarga (amplitude), a resistividade do solo onde a torre está instalada, o número de para-raios instalados na torre e o tipo de linha em questão (circuito simples ou duplo).

2.0 - CASO SIMULADO E MODELAGEM

2.1 Caso simulado

É simulada a incidência de descarga atmosférica diretamente no topo de torres de transmissão de 138 kV. Os condutores fase das linhas simuladas são o CAA Linnet, enquanto o cabo de blindagem é do tipo 3/8" EHS. A Figura 1 - (a) ilustra a geometria considerada para as torres de circuito simples simuladas, enquanto a Figura 1 - (b) apresenta a geometria das torres de circuito duplo.

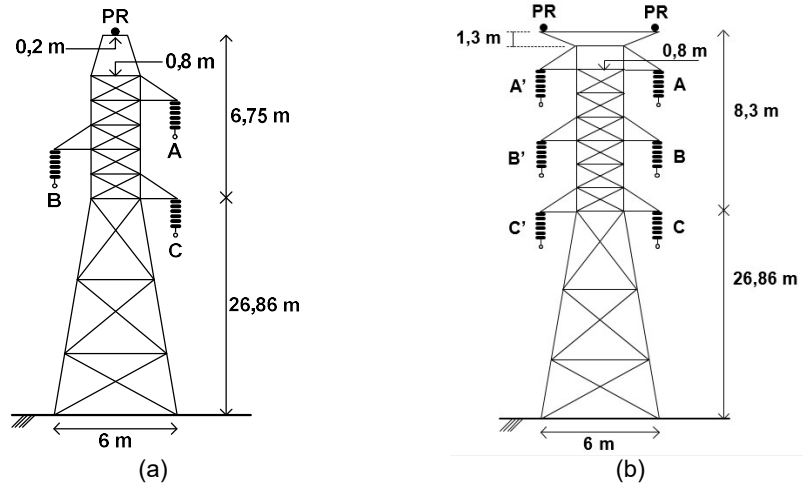


Figura 1 - (a) Torre de circuito simples e (b) Torre de circuito duplo

Um par de torres adjacentes à torre de incidência deve ser inserido nas simulações, a fim de considerar o efeito de propagação das ondas de tensão, bem as suas reflexões dessas ondas (2). Nas simulações deste trabalho, considerou-se um comprimento de vão de 400 m.

As torres consideradas são do tipo autoportantes e possuem o mesmo sistema de aterramento, composto de quatro condutores radialmente dispostos e conectados a cada um dos pés da torre de transmissão. Os condutores de aterramento, ou cabos contrapeso, possuem raio de 7 mm, e estão enterrados a 0,5 m de profundidade.

A Figura 2 ilustra o arranjo de aterramento considerado para o caso de estudo.

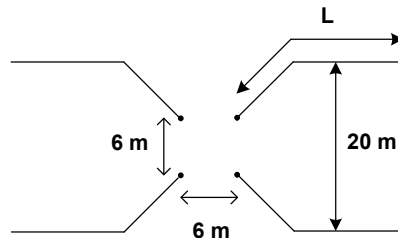


Figura 2 – Arranjo de aterramento de pé de torre

O comprimento L dos cabos contrapeso varia conforme a resistividade do solo ρ . A Tabela 1 apresenta a relação de resistividades do solo abordadas no trabalho, bem como os respectivos comprimentos de cabos contrapeso considerados. Os comprimentos abaixo basearam-se em valores adotados em sistemas de aterramento de linhas de transmissão brasileiras.

Tabela 1 – Comprimento de cabos contrapeso em função da resistividade do solo

ρ (Ωm)	L (m)
1000	40
3000	60
10000	130

2.2 Modelagem

Descrito o caso a ser simulado e elencadas as características da linha de transmissão, são apresentados abaixo os modelos adotados para cada um dos elementos envolvidos no caso sob estudo. Ressalta-se que os modelos empregados nas simulações consideram a característica impulsiva do fenômeno sob estudo.

2.2.1 Sistema de aterramento

O aterramento é o elemento da linha de transmissão que mais influencia a ocorrência ou não de desligamento por *backflashover* (3).

Em função do caráter impulsivo das correntes de descargas atmosféricas, estas apresentam um espectro representativo de frequências que vai desde 0 Hz até alguns MHz. Ao longo desse espectro, o aterramento tem seu comportamento variável tendo-se em conta diferentes intervalos de frequência. Nesse sentido, para estudos que envolvam descargas atmosféricas, a representação do aterramento por sua resistência de aterramento de baixa frequência é errônea.

A resposta em frequência do aterramento é determinada com elevada exatidão empregando-se modelos matemáticos baseados na teoria de campos eletromagnéticos. Apesar da evolução no desenvolvimento de modelos rigorosos para avaliação do comportamento transitório de aterramentos nos últimos anos, o tema encerra certa complexidade e modelos simplificados ou compactos são normalmente adotados. Nesse contexto, é comum a utilização do conceito de impedância impulsiva, que corresponde à razão entre o valor de pico da elevação de potencial desenvolvida no ponto de injeção de corrente e o valor de pico (amplitude) da onda de corrente injetada. A impedância impulsiva corresponde a um número real e pode ser utilizada para representar de forma compacta o aterramento em simulações no ATP de transitórios de origem atmosférica.

Na dissertação de mestrado (4) é proposta uma metodologia engenhosa e original para a determinação da impedância impulsiva de configurações genéricas de aterramento. Apresenta-se, a seguir, os passos relativos a essa metodologia para o caso de aterramentos de linhas de transmissão.

- i) Calcula-se o comprimento efetivo (L_{EF}) do eletrodo de aterramento, dadas a resistividade do solo e a corrente impulsiva a ser injetada. O cálculo de L_{EF} pode ser feito utilizando fórmulas de engenharia apresentadas na referência (5).
- ii) Considerando-se o arranjo de aterramento original, determina-se o chamado arranjo equivalente, isto é, a parte do sistema de aterramento que efetivamente contribui para a determinação da impedância impulsiva, a partir do ponto de injeção de corrente e do comprimento efetivo, conforme ilustrado na Figura 3.
- iii) Calcula-se a resistência de aterramento em baixa frequência do arranjo equivalente (R_{eq}). Este cálculo pode ser feito utilizando programas comerciais.
- iv) Calcula-se o coeficiente de impulso (I_C), considerando a resistividade do solo e a corrente impulsiva a ser injetada. O cálculo de I_C pode ser feito utilizando fórmulas de engenharia apresentadas na referência (5).
- v) Determina-se a impedância impulsiva (Z_P) do sistema de aterramento original por meio do produto da resistência de aterramento do arranjo equivalente e do coeficiente de impulso, isto é, $Z_P = I_C \times R_{eq}$.

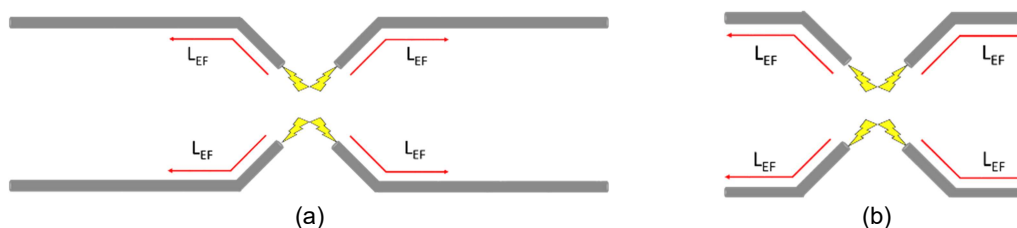


Figura 3 – Arranjo de aterramento original (a) e arranjo de aterramento equivalente (b). Adaptado de (4).

A descrição detalhada da metodologia pode ser encontrada em (4). A Tabela 2 apresenta os valores de impedâncias impulsivas Z_P para uma onda de primeira descarga, determinados de acordo com a metodologia descrita.

Tabela 2 – Valores de impedância impulsiva

ρ (Ωm)	L (m)	Z_P (Ω)
1000	40	11,64
3000	60	22,59
10000	130	31,53

2.2.2 Condutores de transmissão

Os condutores das linhas de transmissão – cabos fase e cabos para-raios – são representados a partir da ferramenta LCC, do ATP. Nessa ferramenta é utilizado o modelo JMarti de linha dependente da frequência (6).

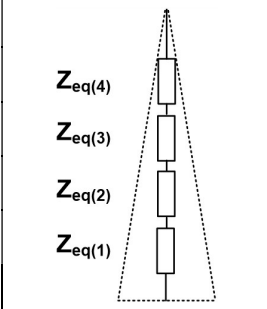
2.2.3 Torre de Transmissão

As torres de transmissão são modeladas como linhas de transmissão monofásicas sem perdas, cuja impedância de surto é calculada de acordo com as dimensões da torre por meio da fórmula de Jordan revisada (7). A velocidade de propagação da onda na torre é de $2,4 \times 10^8$ m/s.

Cada torre foi dividida em quatro segmentos de linhas de transmissão, separados em razão das variações nas dimensões da torre ao longo de sua estrutura, que por sua vez refletem em variações na impedância de surto.

A Tabela 3 abaixo apresenta a impedância de surto e o comprimento da linha de transmissão monofásica referente a cada trecho das torres de transmissão de circuito simples e duplo.

Tabela 3 – Impedâncias de surto (Z_s) e comprimento (x) de trechos de torres de transmissão

	Torre de Circuito Simples			Torre de Circuito Duplo		
	Linha	Z_s (Ω)	x (m)	Linha	Z_s (Ω)	x (m)
$Z_{eq(4)}$	$Z_{eq(4)}$	289,75	6,75	$Z_{eq(4)}$	280,50	8,30
$Z_{eq(3)}$	$Z_{eq(3)}$	235,24	8,86	$Z_{eq(3)}$	235,24	8,86
$Z_{eq(2)}$	$Z_{eq(2)}$	182,20	9,00	$Z_{eq(2)}$	182,20	9,00
$Z_{eq(1)}$	$Z_{eq(1)}$	130,64	9,00	$Z_{eq(1)}$	130,64	9,00

2.2.4 Para-raios

A Tabela 4 apresenta as características principais dos dispositivos para-raios de ZnO modelados nas análises discutidas no presente IT, as quais foram retiradas de (8).

Tabela 4 – Especificações técnicas do para-raios considerado nas análises (8)

Classe de descarga de LT	2
Corrente nominal de descarga (kA)	10
Altura (m)	1,24
Número de colunas ZnO em paralelo	1
Tensão nominal (kV)	132
Máxima tensão de operação contínua (kV)	106
Tensão residual para corrente de 1 kA 30/60 μs (kV)	269
Tensão residual para corrente de 10 kA 8/20 μs (kV)	337

Nas simulações realizadas no ATP, foi utilizado o modelo dependente da frequência do para-raios proposto pelo grupo de estudo do IEEE (9), ilustrado na Figura 4.

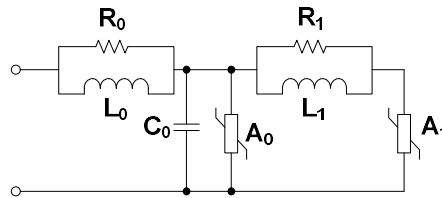


Figura 4 – Representação do modelo de para-raios. Adaptado de (9)

Nesse circuito, A_0 e A_1 são resistores não lineares. Os valores dos resistores, indutores e do capacitor apresentados dependem de aspectos geométricos do dispositivo, conforme critério descrito em (9). Para o modelo de para-raios adotado, os valores dos parâmetros do circuito acima são:

- $L_0 = 0,248 \mu\text{H}$
- $L_1 = 26,76 \mu\text{H}$
- $R_0 = 124 \Omega$
- $R_1 = 80,56 \Omega$
- $C = 8,06 \mu\text{F}$

A Figura 5 apresenta as curvas que ilustram o comportamento tensão-corrente dos resistores não-lineares A_0 e A_1 , também determinadas de acordo com procedimento descrito em (9).

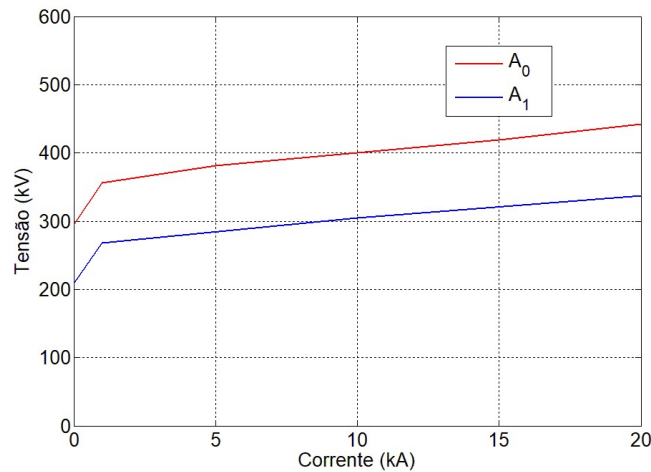


Figura 5 – Comportamento tensão-corrente dos resistores não-lineares A_0 e A_1

2.2.5 Descarga atmosférica

As descargas atmosféricas são simuladas como a soma de sete fontes de corrente Heidler, cujos parâmetros de entrada no ATP são apresentados abaixo. Na amplitude de cada fonte de corrente Heidler deve ser inserido o valor apresentado na Tabela 5 abaixo multiplicado pelo valor de pico (I_{PICO}) da descarga atmosférica em kA. Dessa forma, a onda resultante terá como amplitude o valor de I_{PICO} definido, bem como o típico formato e tempos associados de primeiras descargas de retorno.

Tabela 5 – Parâmetros de fontes de corrente Heidler

k	Amplitude (A)	T_f (μs)	tau (μs)	n
1	I_{PICO} [kA] x 141,29	10,83	76,0	2
2	I_{PICO} [kA] x 103,75	5,68	10,0	3
3	I_{PICO} [kA] x 108,12	84,36	30,0	5
4	I_{PICO} [kA] x 172,68	8,62	26,0	9
5	I_{PICO} [kA] x 360,68	8,12	23,3	30
6	I_{PICO} [kA] x 355,88	112,15	200,0	2
7	I_{PICO} [kA] x 256,82	15,02	26,0	14

A soma dessas ondas produz a forma de onda abaixo, considerando uma amplitude de descarga de $I_{\text{PICO}} = 45 \text{ kA}$, que corresponde ao valor mediano de descargas medidas na Estação do Morro do Cachimbo, instalada na região metropolitana de Belo Horizonte, no estado de Minas Gerais (10). A forma de onda em questão reproduz importantes características das primeiras descargas de retorno, tais como a ocorrência de múltiplos picos, taxa de crescimento máxima próxima ao primeiro pico, natureza côncava da curva nos instantes iniciais, entre outras (11).

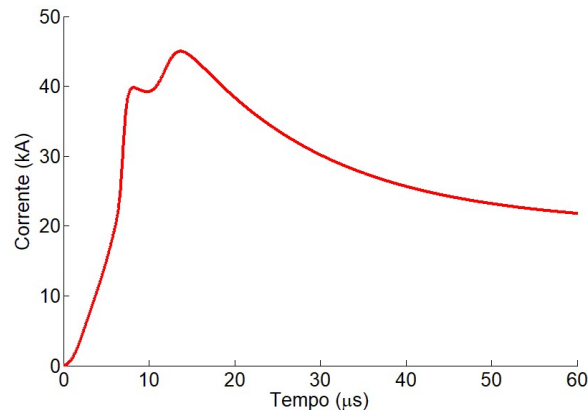


Figura 6 – Forma de onda de descarga atmosférica simulada

2.2.6 Ruptura de isolamento

A ruptura de isolamento do isolador é atestada pelo método do efeito disruptivo (DE – *Disruptive Effect*) (12). Esse método se baseia no conceito de que cada onda de sobretensão possui um dado efeito disruptivo (DE) associado. Analogamente, isoladores possuem um efeito disruptivo crítico (DE_C), o qual está associado à capacidade de o isolador manter suas características dielétricas quando exposto a campos elétricos elevados.

Esse método consiste em comparar os efeitos disruptivos da sobretensão atmosférica (DE) e o efeito disruptivo crítico do isolador (DE_C). Caso o efeito disruptivo da sobretensão supere o efeito disruptivo crítico do isolador, atesta-se que a onda simulada provocaria a ruptura do isolamento, e conseqüente desligamento da linha de transmissão.

3.0 - RESULTADOS

Apresentados os modelos de cada elemento, são conduzidas simulações da incidência de descargas atmosféricas diretamente no topo de torres de transmissão de circuito simples sem para-raios, com para-raios em uma fase e com para-raios em duas fases. Os para-raios, quando instalados, são posicionados geralmente nas fases mais baixas da torre, que em função do menor acoplamento com os cabos de blindagem geralmente tem suas cadeias de isoladores submetidas às maiores sobretensões. Logo, a instalação nesta posição resulta em maior nível de proteção para as linhas (2).

A Figura 7 apresenta as formas de onda das sobretensões mais críticas alcançadas nos terminais de isoladores da torre. Ressalta-se que as sobretensões mais críticas são registradas nas fases mais baixas não protegidas por para-raios. A linha simulada é de circuito simples, instalada sob um solo de resistividade de $3000 \Omega\text{m}$. Essa condição é simulada para a incidência de uma descarga de 45 kA .

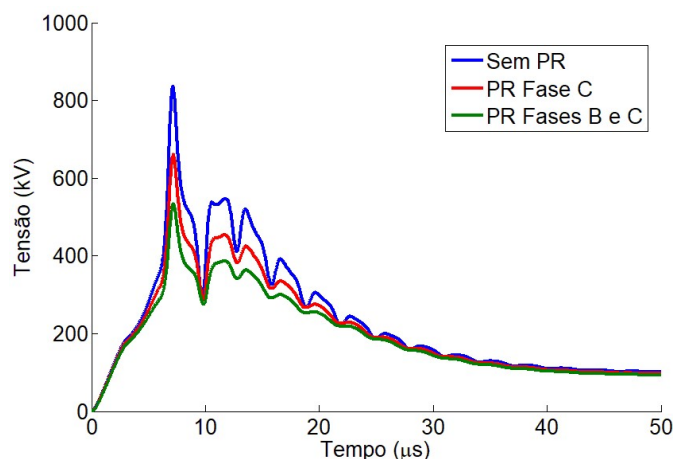


Figura 7 – Sobretensões nas cadeias de isoladores desprotegidas resultantes de uma descarga atmosférica de 45 kA em torres de transmissão

Observa-se que os níveis de sobretensões alcançados em torres sem para-raios são consideravelmente superiores às sobretensões em torres com apenas um para-raios. São ainda maiores se comparadas às sobretensões em torres protegidas por dois para-raios.

As conclusões extraídas a partir da Figura 7 sugerem que dispositivos para-raios podem, de fato, proteger linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas ainda que não instalados em todas as fases das torres. Registra-se, ainda, a importante constatação de que para-raios também atuam na redução de sobretensões em fases não protegidas por estes.

A partir dessa constatação prévia, são realizadas simulações considerando outras condições de incidência, a fim de permitir uma análise de sensibilidade da influência do tipo de linha, resistividades do solo, estratégia de proteção por dispositivos para-raios, e amplitude de descarga atmosférica. São avaliados os efeitos disruptivos de cada condição de simulação, comparando-os com os efeitos disruptivos críticos associados, e constatando a ruptura ou não da rigidez dielétrica dos isoladores da linha de transmissão.

São variadas as seguintes condições:

- Linhas de circuito simples e linhas de circuito duplo;
- Resistividades do solo de 1000, 3000 e 10000 Ωm ;
- Quantidade e posicionamento de para-raios na torre (ver Tabela 6 e Tabela 7);
- Descargas atmosféricas com amplitude entre 1 e 150 kA.

A partir dessas simulações, é levantado um importante resultado relativo ao estudo em questão: a amplitude crítica de descarga (I_c). Trata-se do valor de amplitude de descarga atmosférica incidente a partir do qual ocorreria a ruptura do isolamento da linha de transmissão e seu consequente desligamento.

A Tabela 6 abaixo apresenta a amplitude crítica de descarga para diversas condições de instalação de para-raios na torre de circuito simples. Adicionalmente, mostra também a probabilidade de uma dada descarga atmosférica superar esse valor. Essa probabilidade é levantada a partir de dados estatísticos de descargas atmosféricas medidas na Estação Morro do Cachimbo, em MG (10).

Tabela 6 – Amplitudes críticas de descarga em torres de circuito simples

Caso	$\rho_0 = 1000 \Omega\text{m}$		$\rho_0 = 3000 \Omega\text{m}$		$\rho_0 = 10000 \Omega\text{m}$	
	I_c (kA)	$P(I) > I_c$ (%)	I_c (kA)	$P(I) > I_c$ (%)	I_c (kA)	$P(I) > I_c$ (%)
Sem PR	87	7,10	57	28,5	45	50,0
PR na fase C	111	2,87	72	13,8	58	27,1
PRs nas fases B e C	146	1,06	95	5,15	75	12,0
PR em todas as fases	–	0,00	–	0,00	–	0,00

A Tabela 6 acima quantifica a expressiva influência da resistividade do solo no desempenho de uma linha de transmissão frente a descargas atmosféricas. Quanto mais resistivo o solo, maiores as probabilidades de ruptura do isolamento da linha. Também mostra quão relevante pode ser a instalação de para-raios, diminuindo expressivamente a probabilidade de desligamento da linha de transmissão, ainda que não instalados em todas as

fases da torre. Comparando-se às condições de torres desprotegidas por para-raios, as probabilidades de ruptura de isolamento são consideravelmente reduzidas mediante a instalação de para-raios na fase C. No caso de instalação de para-raios nas fases B e C essa redução é ainda mais expressiva.

Observa-se, portanto, que é factível aumentar-se a confiabilidade de linhas de transmissão a partir da instalação de para-raios em apenas uma ou duas fases. Ressalta-se que a instalação de apenas um ou dois para-raios não garante a não ocorrência de *backflashover* na torre em questão. Ainda que a probabilidade de ruptura seja expressivamente reduzida, apenas a instalação de para-raios em todas as fases garante a não ocorrência de *backflashover* na torre integralmente protegida.

A Tabela 7 abaixo apresenta uma análise semelhante, porém para torres de circuito duplo, avaliando as amplitudes críticas de descarga e as respectivas probabilidades associadas, para diversas condições de aterramento e de proteção por para-raios.

Tabela 7 – Amplitudes críticas de descarga em torres de circuito duplo

Caso	$\rho_0 = 1000 \Omega m$		$\rho_0 = 3000 \Omega m$		$\rho_0 = 10000 \Omega m$	
	I_c (kA)	$P(I) > I_c$ (%)	I_c (kA)	$P(I) > I_c$ (%)	I_c (kA)	$P(I) > I_c$ (%)
Sem PR	99	4,4	68	16,7	55	31,4
PR na fase C	120	2,1	82	8,8	67	17,5
PRs nas fases C e C'	>150	<1%	101	4,1	93	5,6
PR nas fases B' e C	>150	<1%	104	3,7	84	8,1
PR nas fases A, B' e C	>150	<1%	112	2,8	91	6,0
PR nas fases B, B', C e C'	>150	<1%	>150	<1%	123	1,9
PR em todas fases	–	0.00	–	0.00	–	0.00

Essas simulações reforçam as conclusões extraídas para torres de circuito simples. Observa-se a influência expressiva do sistema de aterramento e da instalação de dispositivos para-raios em algumas fases da torre. Nota-se ainda, que a instalação de para-raios em torres de circuito duplo é mais efetiva nas fases se os dispositivos são instalados nas fases inferiores da torre.

Adicionalmente, observa-se que linhas de circuito duplo apresentam desempenho frente a descargas atmosféricas superior às linhas de circuito simples, apresentando amplitudes críticas de descarga superiores. Isso ocorre devido ao maior acoplamento existente nessas torres, ocasionando uma tensão induzida nas fases sãs e reduzindo a diferença de pontencial sob a cadeia de isoladores. Observa-se que para algumas configurações de proteção por para-raios e de sistemas de aterramento, a amplitude crítica de descarga é superior a 150 kA, tornando remotas as probabilidades de *backflashover*. Ainda assim, para algumas condições de projeto, sobretudo envolvendo solos resistivos, as probabilidades de desligamento são, ainda, consideráveis.

A Figura 8 apresenta ondas de sobretensão resultantes de descargas atmosféricas de 45 kA em torres de circuito simples e em torres de circuito duplo, ambas sem dispositivos para-raios e instaladas sob solo de 3000 Ωm . Observa-se como as tensões registradas em isoladores de torres de circuito simples são superiores, justificando os resultados supracitados.

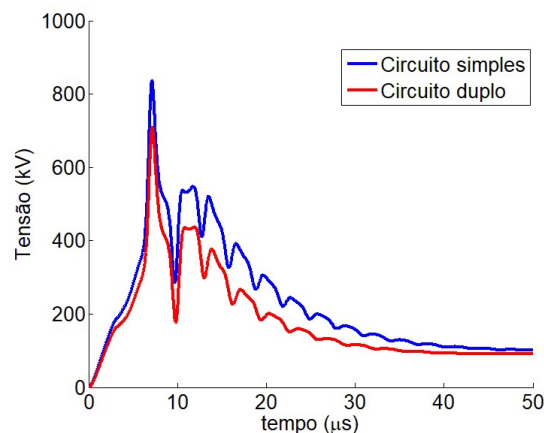


Figura 8 – Ondas de sobretensão em torres de circuito simples e duplo

4.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho abordou aspectos importantes a respeito da proteção de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Os resultados extraídos de simulações reforçaram a relevância do sistema de aterramento no desempenho de linhas. Demonstrou-se também que dispositivos para-raios podem, de fato, apresentar papel decisivo na proteção de linhas de transmissão frente descargas, ainda que não instalados em todas as suas fases. Observou-se, ainda, que linhas de circuito duplo tendem a ser menos propensas à ruptura por *backflashover* que linhas de circuito simples.

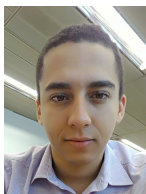
Ressalta-se que a ruptura por *backflashover* é plenamente evitada mediante a instalação de para-raios em todas as fases das torres. Ainda assim, a instalação de para-raios em apenas algumas fases da linha é uma alternativa econômica para melhoria do desempenho de linhas de transmissão frente descargas atmosféricas, reduzindo as sobretensões de fases protegidas e não protegidas por estes. As probabilidades de desligamento da linha são, portanto, consideravelmente minimizadas. Essas conclusões são quantificadas na Tabela 6 e na Tabela 7, observando diversas condições de projeto de linhas de transmissão.

Por fim, vale ressaltar que a metodologia de simulação apresentada neste trabalho tem boa exatidão sob o ponto de vista de engenharia, e utiliza a plataforma ATP, que é de domínio público. Portanto, seguindo os passos apresentados na Seção 2.0 - do artigo, estudos similares podem ser desenvolvidos considerando outras silhuetas de torre, outros sistemas de aterramento e resistividades do solo, e linhas de diferentes níveis de tensão.

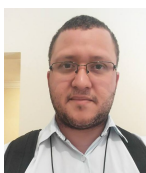
5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) R. O. PEDROSA. *Estudo da Absorção de Energia de Para-raios de ZnO Instalados em Linhas de Transmissão de 138 kV*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (PPGEE/UFMG). 2013.
- (2) R. ALÍPIO, M. H. R. DUARTE, J. C. A. DIAS, and A. S. De MIRANDA. *Lightning performance of transmission lines partially protected by surge arresters considering typical brazilian conditions*. in Proc. 2007 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA), Natal, Brazil, pp. 1–5. 2017.
- (3) M. H. R. DUARTE. *Impacto da Representação de Sistemas de Aterramento no Desempenho de Para-Raios de Linhas de Transmissão*. Dissertação de mestrado, Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade de São João Del-Rei e Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (UFSJ/CEFET-MG). 2018.
- (4) F.M.S. BORGES. *Metodologia para determinação da impedância impulsiva para arranjos típicos de aterramentos elétricos*. Dissertação de Mestrado, Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade de São João Del-Rei e Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (UFSJ/CEFET-MG). 2017.
- (5) R. ALÍPIO, S. VISACRO. *Impulse efficiency of grounding electrodes: effect of frequency dependent soil parameters*. IEEE Trans. Power Delivery, vol. 29, no. 2, pp. 716–723. 2014.
- (6) J. R. MARTI. *Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulation*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 1, pp. 147–157. 1982.
- (7) A. De CONTI, S. VISACRO, A. SOARES, and M. A. O. SCHROEDER. *Revision, extension and validation of Jordan's formula to calculate the surge impedance of vertical conductors*. IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 48, n. 3, pp. 530–536. 2006.
- (8) Siemens: High-voltage surge arresters – product guide [Online]. Available: [http:// siemens.com/energy/arrester](http://siemens.com/energy/arrester). 2017.
- (9) IEEE Working Group on Surge Arrester Modeling. *Modeling of metal oxide surge arresters*. IEEE Trans. Power Delivery, vol. 7, no. 1, pp. 302–309. 1992.
- (10) S. VISACRO, A. SOARES, M. A. O. SCHROEDER, L. C. L. CHERCHIGLIA, and V. J. SOUSA. *Statistical analysis of lightning current parameters: measurements at Morro do Cachimbo station*. Journal on Geophysical Research, vol. 109, D01105, pp. 1–11. 2004.
- (11) A. CONTI, S. VISACRO. *Analytical Representation of Single- and Double-Peaked Lightning Current Waveforms*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 49, no. 2. 2007.
- (12) A. R. HILEMAN. *Insulation Coordination for Power Systems*. CRC Press, pp.627–640. 1999.

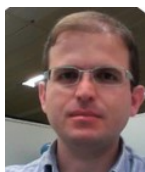
6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Matheus Henrique Rosa Duarte. É mestre em Engenharia Elétrica (2018) pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), graduado em Engenharia Elétrica (2015) pelo CEFET-MG. Atualmente é Engenheiro de Equipamentos – Elétrica na Petrobras. Possui experiência de trabalho e pesquisa na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em equipamentos elétricos, linhas de transmissão e seu desempenho frente descargas atmosféricas, sistemas de aterramento, interferência eletromagnética.



Rafael Silva Alípio. É doutor em Engenharia Elétrica (2013) pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), mestre em Modelagem Matemática e Computacional (2008) pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), graduado em Engenharia Elétrica (2007) pelo CEFET-MG e graduado em Física (2008) pela UFMG. Atualmente é Professor do Departamento de Engenharia Elétrica do CEFET-MG, carreira EBTT em regime de Dedicção Exclusiva, e membro permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica dessa mesma instituição. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: eletromagnetismo aplicado, aterramentos elétricos (modelagem, medição e desempenho frente às descargas atmosféricas), transitórios eletromagnéticos e interação de descargas atmosféricas com o sistema elétrico. Em 2016, recebeu o *Motohisa Kanda Award for Most Cited (2011-2015) IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility Paper*, em reconhecimento ao trabalho: "*The Response of Grounding Electrodes to Lightning Currents: The Effect of Frequency-Dependent Soil Resistivity and Permittivity*".



Sandro de Castro Assis possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, em 2004, 2006 e 2017, respectivamente. Atualmente é engenheiro sênior de projetos de sistemas elétricos de linhas de transmissão e subestações da CEMIG Distribuição e professor do IEC PucMinas no curso de Transmissão e Distribuição. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Transmissão de Energia Elétrica, Estudos Elétricos em SEP, inclusive em área industrial. É membro dos comitês de estudo CE-C4 - Desempenho de Sistemas Elétricos, CE-B3 – Subestações, CE-B2 – Linhas de Transmissão do Cigré Brasil.