



Grupo de Estudo de Desempenho de Sistemas Elétricos-GDS

Avaliação do Efeito da Distribuição de Incidência de Descargas Atmosféricas ao Longo do Vão no Desempenho de Linhas de Transmissão: Análise Crítica da Forma Tradicional de Cômputo pelo Fator 0,6

FERNANDO HENRIQUE SILVEIRA(1); SILVERIO VISACRO(1); RAFAEL MAIA GOMES(1); UFMG(1)

RESUMO

Este trabalho apresenta a investigação do efeito da distribuição de incidência de descargas ao longo do vão no cálculo da taxa de desligamentos por backflashover de linhas de transmissão e a análise crítica da forma tradicional de se adotar o fator 0,6. Simulações computacionais considerando metodologia avançada de cálculo foram desenvolvidas considerando configuração real de linha de 138 kV, forma de onda representativa de corrente de primeira descarga e distribuição de descargas estimada pelo método de Monte Carlo. Fatores de vão 30 a 40% superiores ao fator 0,6 tradicionalmente recomendado são obtidos, impactando fortemente a taxa de desligamentos estimada.

PALAVRAS-CHAVE

Backflashover, Desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas, Forma de onda representativa de corrente de descarga, Raio de atração.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os procedimentos adotados pelas empresas do setor elétrico para o cálculo de desempenho de linhas de transmissão (LT) frente a descargas atmosféricas seguem de forma geral as recomendações apresentadas pelos documentos de referência do CIGRE e do IEEE (1,2). Tais procedimentos são de extrema relevância para determinação do tipo de prática de proteção a ser implementada em linhas já em operação ou ainda em fase de concessão. A determinação do desempenho da LT provê elementos para que intervenções sejam feitas na linha de modo a adequar sua taxa de desligamentos a índices de desempenho estipulados pelas agências reguladoras.

Atualmente, o grupo internacional do CIGRE WG C4.23 tem atuado na revisão da brochura 63 (*Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines*) (1). Os autores do presente trabalho do SNPTEE têm apresentado um conjunto consistente de contribuições ao grupo internacional que contemplam soluções para as condições típicas do ambiente brasileiro.

Um procedimento importante recomendado pelo CIGRE que está em discussão e tem impacto direto no cálculo da taxa de desligamentos de linhas de transmissão se refere à representação do efeito da distribuição de incidência de descargas ao longo do vão. Tal procedimento consiste em determinar esta taxa assumindo que a incidência de todas as descargas se concentre na torre e, em seguida, aplicar um fator multiplicativo "0,6" à taxa de modo a se ter em conta o efeito das descargas que incidem no cabo de blindagem ao longo do vão. Neste tipo de ocorrência, a amplitude da corrente que flui para o solo através da torre mais próxima ao ponto de incidência de descarga tende a ser inferior àquela proveniente de incidências diretas na torre. Assim, a elevação de potencial resultante no

aterramento da torre, o potencial associado no topo da torre e a tensão correspondente nos isoladores se reduzem, diminuindo a probabilidade de ocorrência de backflashover.

O suporte técnico para aplicação do fator 0,6 em estudos relativos à análise de desempenho de linhas está associado a condições muito simplificadas do processo de cálculo como a modelagem analítica dos componentes da linha, a representação da onda de corrente de descarga em formato de rampa e o uso de modelo para estimativa de flashover baseado apenas no valor de pico da sobretensão resultante na cadeia de isoladores.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar um exame da consistência deste procedimento simplificado e propor alternativas para a representação do efeito da distribuição de incidência de descargas ao longo do vão de linhas de transmissão nas metodologias analíticas empregadas pelas empresas do setor elétrico.

Os desenvolvimentos do trabalho consideram a aplicação de metodologia avançada de cálculo de desempenho baseada no uso do elaborado modelo computacional HEM (*Hybrid Electromagnetic Model*) (3) para o cálculo das sobretensões resultantes nos isoladores de linhas reais e aplicação do método DE (*Disruptive Effect Method*) (4) para definição de ocorrência de arco elétrico entre os isoladores da linha devido a essas sobretensões. As análises consideram, também, a aplicação do método de Monte Carlo (5) para se estimar a distribuição de incidência de descargas ao longo do vão.

Para dar suporte às análises de sensibilidade realizadas, foi considerada uma configuração real de linha de transmissão de nível de tensão de 138 kV em operação no Brasil e seus vãos típicos, a representação apurada dos aterramentos elétricos e a aplicação de forma de onda representativa de correntes de primeira descarga reais.

2.0 - O CONTEXTO DO FATOR DE VÃO PARA REPRESENTAÇÃO DO EFEITO DE INCIDÊNCIAS DE DESCARGAS AO LONGO DO VÃO

A distribuição das incidência de descargas ao longo do vão de uma linha transmissão tem impacto direto nas sobretensões resultantes em suas cadeias de isoladores e, conseqüentemente, no seu desempenho frente às descargas atmosféricas.

Em geral, há uma tendência de que a densidade de incidência de descargas na torre e em suas proximidades seja maior do que aquela na região do meio do vão. Além disso, as incidências de descargas nos cabos de blindagem ao longo do vão produzem sobretensões inferiores nos isoladores da linha em comparação àquelas relativas à incidência de descarga direta no topo da torre, considerando-se um evento de descarga com as mesmas características. A medida que o ponto de incidência de descarga se distancia da torre, menores são os valores de corrente na torre, contribuindo para a redução do potencial associado no topo da torre e a tensão correspondente em seus isoladores. Conseqüentemente, a probabilidade de tal incidência resultar em backflashover também diminui. A Figura 1 ilustra este comportamento considerando a incidência de descarga com formato de onda de corrente duplo pico, valor de pico de corrente de 31 kA, $Td30 = 3,8 \mu s$.

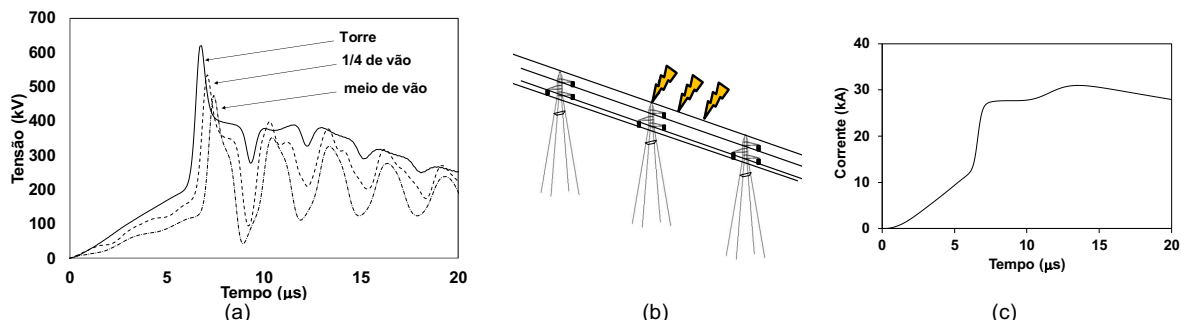


Figura 1 – Efeito do ponto de incidência da descarga ao longo do vão na sobretensão resultante na cadeia de isoladores da LT. (a) Sobretensões, (b) Pontos de incidência de descarga, (c) Forma de onda de corrente representativa (duplo-pico).

A abordagem adotada pelos documentos de referência do CIGRE e IEEE para se ter em conta o efeito da distribuição de incidência de descargas ao longo do vão consiste em se calcular a taxa de desligamentos por backflashover (BFOR) da linha assumindo-se a incidência de descargas apenas nas torres e a posterior aplicação de um “fator de vão” multiplicador no resultado obtido. Este procedimento permite a determinação direta da taxa de desligamentos a partir do número esperado de incidências na linha (NL) e da probabilidade (P) de correntes que excedem um determinado valor de corrente crítica (I_c) mínimo capaz de levar à ruptura do isolamento da cadeia de isoladores.

O efeito de redução da sobretensão a medida que ponto de incidência de descarga se afasta da torre sugere a adoção de um fator de vão que seja menor que 1. Tradicionalmente, o valor considerado para esse fator é “0,6”.

$$BFOR = \text{Fator v\~{a}o} \cdot NL \cdot \sum_{n=1}^n P(I_{cn})/n \quad (1)$$

Em (1), n corresponde ao n\u00famero de torres e I_{cn} \u00e0 corrente cr\u00edtica espec\u00edfica da torre n.

O suporte t\u00e9cnico para a ado\u00e7\u00e3o do fator de v\u00e3o “0,6” foi desenvolvido h\u00e1 muito tempo com o objetivo de incorpora\u00e7\u00e3o em procedimentos anal\u00edticos de f\u00e1cil implementa\u00e7\u00e3o para estimativa da taxa de desligamentos de LTs. Mais especificamente, a ado\u00e7\u00e3o de tal fator estaria associada \u00e0 representa\u00e7\u00e3o simplificada da onda de corrente de descarga, com formato triangular e o crescimento linear de sua frente de onda. Conforme denotado em (6,7), este tipo de representa\u00e7\u00e3o n\u00e3o \u00e9 compat\u00edvel com as ondas individuais de corrente de primeira descarga reais medidas em torres instrumentadas, caracterizadas pelo formato c\u00f4ncavo em seus primeiros microssegundos, seguido pelo crescimento abrupto at\u00e9 o primeiro pico de corrente e a presen\u00e7a de m\u00faltiplos picos. Al\u00e9m disso, a proposi\u00e7\u00e3o do fator de v\u00e3o 0,6 assumiu o modelo para estimativa de flashover dos isoladores dependente apenas do valor de pico da sobretens\u00e3o resultante, desconsiderando o comportamento de sua forma de onda.

3.0 - DESENVOLVIMENTOS

As avalia\u00e7\u00f5es deste trabalho foram desenvolvidas com base em resultados de simula\u00e7\u00f5es computacionais utilizando a metodologia denominada HEM-DE, composta pela aplica\u00e7\u00e3o do modelo HEM (3) para o c\u00e1lculo das sobretens\u00f5es resultantes nos isoladores da linha e o m\u00e9todo DE para se estimar a ocorr\u00eancia de backflashover nos isoladores (4).

O modelo HEM \u00e9 um modelo eletromagn\u00e9tico tradicionalmente utilizado para o c\u00e1lculo da resposta de sistemas el\u00e9tricos frente \u00e0s descargas atmosf\u00e9ricas, com destacada aplica\u00e7\u00e3o no c\u00e1lculo das sobretens\u00f5es nas cadeias de isoladores de LTs. Os detalhes deste modelo e de sua aplica\u00e7\u00e3o, bem como a sua valida\u00e7\u00e3o com base em resultados experimentais, s\u00e3o apresentados em diversas publica\u00e7\u00f5es da literatura (3,8-11). Apesar de implicar maior tempo de processamento, a aplica\u00e7\u00e3o desse modelo possibilita gerar resultados mais precisos e de validade generalizada em rela\u00e7\u00e3o aos obtidos por modelagens com abordagem anal\u00edtica ou de representa\u00e7\u00e3o por par\u00e2metros de circuitos. A representa\u00e7\u00e3o do sistema f\u00edsico \u00e9 realizada diretamente a partir da geometria dos condutores envolvidos e das constantes dos meios nos quais estes est\u00e3o imersos, sendo que a solu\u00e7\u00e3o do problema j\u00e1 contempla automaticamente os complexos acoplamentos eletromagn\u00e9ticos e os efeitos de propaga\u00e7\u00e3o.

O m\u00e9todo DE considera a integra\u00e7\u00e3o da forma de onda da sobretens\u00e3o resultante na cadeia de isoladores da linha durante o intervalo de tempo no qual esta excede um determinado valor limite de tens\u00e3o para se determinar a ocorr\u00eancia (ou n\u00e3o) de backflashover na cadeia de isoladores, e, conseq\u00fcentemente, o valor de corrente cr\u00edtica. Trata-se de uma abordagem mais consistente do que aquelas que consideram apenas o valor de pico de tens\u00e3o em tal avalia\u00e7\u00e3o (como o CFO_{MS} (1) e a curva tens\u00e3o – tempo (V_{xt}) (2) adotados nas metodologias do CIGR\u00c9 e IEEE), principalmente quando avaliadas formas de onda de tens\u00e3o n\u00e3o-padronizadas como aquelas relativas as referentes ao fen\u00f4meno de descargas atmosf\u00e9ricas.

Uma vez determinada a corrente cr\u00edtica e com base na distribui\u00e7\u00e3o acumulada dos picos de corrente apresentada pelo IEEE (2), determina-se a porcentagem das correntes incidentes na linha cujos valores sejam superiores \u00e0 corrente cr\u00edtica. Esse n\u00famero corresponde ao percentual de descargas na linha que levariam os isoladores ao backflashover (12).

As avalia\u00e7\u00f5es deste trabalho consideram uma configura\u00e7\u00e3o real de linha de transmiss\u00e3o de n\u00edvel de tens\u00e3o de 138 kV, circuito simples, tipicamente utilizada no Brasil. Tal linha apresenta CFO (tens\u00e3o de 50%) de 650 kV. As torres dessa linha s\u00e3o do tipo autoportante com altura m\u00e9dia de 30 m, conforme ilustrado de forma simplificada na Figura 2.

A forma de onda da corrente de retorno foi representada pela corrente do tipo duplo pico (13) com par\u00e2metros medianos associados \u00e0s primeiras descargas negativas descendentes medidas na esta\u00e7\u00e3o de Monte San Salvatore (MSS) (14), conforme ilustrada na Figura 1 (c). Essa representa\u00e7\u00e3o de corrente reproduz caracter\u00edsticas importantes das formas de onda de corrente reais medidas: a frente de onda c\u00f4ncava e os picos secund\u00e1rios.

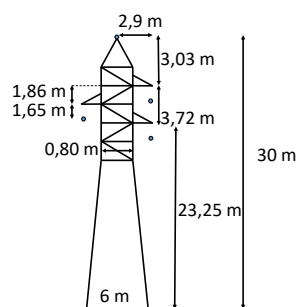


Figura 2 – Representação simplificada da configuração da torre da linha de transmissão de 138 kV.

Apesar do modelo HEM ser capaz de representar apuradamente a configuração física de cabos contrapeso enterrados no solo, as análises deste trabalho consideraram a representação do aterramento de pé de torre por meio do seu valor da impedância impulsiva Z_p para parâmetros medianos da corrente da primeira descarga. De acordo com desenvolvimentos apresentados em (10), o uso do valor de impedância impulsiva Z_p resulta em desempenho da LT praticamente idêntico àquele obtido pela representação física de cabos contrapeso, constituindo-se em uma alternativa consistente de representação. As análises consideraram valores de Z_p entre 10 e 40 Ω para a torre central, mantendo-se fixo o valor de Z_p para as torres adjacentes (20 Ω).

Dois comprimentos de vão foram adotados nas simulações: 400 m e 600 m. Embora este último valor não seja comum em linhas de 138 kV com altura média de 30 m, este foi considerado apenas para fins de análise de sensibilidade.

4.0 - RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Introdução

As análises apresentadas neste trabalho foram divididas em 2 grupos. Inicialmente, são apresentados resultados referentes às sobretensões resultantes na cadeia de isoladores, correntes críticas associadas e a porcentagem de ocorrência de backflashover na torre sob as hipóteses de incidência de descarga no topo da torre e no meio do vão. Tais resultados, apresentados em função da impedância impulsiva de pé-de-torre, dão uma ideia do comportamento do desempenho da torre sob as condições limites de incidência de descarga em um vão da linha.

A seguir, são desenvolvidas análises referentes à distribuição de incidência de descargas ao longo do vão e o seu efeito para o desempenho da linha. Neste caso, considerou-se a incidência de descarga em diversos pontos ao longo do vão (seções de 50 m) e o cálculo da sobretensão resultante nos isoladores da torre para cada ponto de incidência. Em cada caso, determinou-se o valor de corrente crítica associada e a respectiva probabilidade de ocorrência de backflashover na torre. Com base nesses resultados e na distribuição de incidências ao longo do vão obtida pela aplicação de procedimento baseado no método de Monte Carlo e na fórmula de raio de atração proposta em (2), obtém-se expectativa de desempenho da linha em termos da probabilidade de ocorrência de backflashover.

4.2 Análise de desempenho da torre: incidência de descarga no topo da torre e no meio do vão

A Figura 3 apresenta as sobretensões resultantes na cadeia de isoladores inferior da LT considerando a incidência de descarga no topo da torre e no meio do vão, para vãos de 400 m e 600 m e valor de impedância impulsiva de aterramento de 20 Ω . A Tabela 1 indica os valores de pico de tensão associados a tais incidências para valores de Z_p entre 10 a 40 Ω . A razão V_p , definida como a relação entre os valores de pico de tensão devido à incidência de descarga no meio do vão e no topo da torre, também é apresentada.

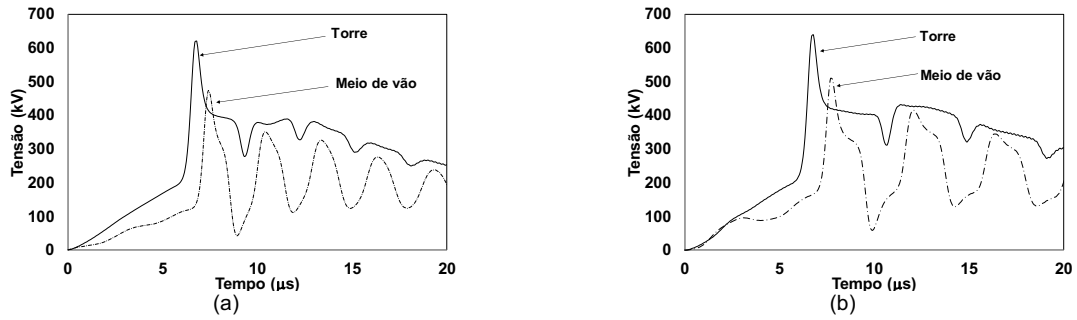


Figura 3 - Sobretensões na cadeia de isolador inferior da LT de 138 kV em função do ponto de incidência de descarga: (a) vão de 400 m, (b) vão de 600 m. Impedância impulsiva dos eletrodos de aterramento (Z_p): 20 Ω .

Conforme esperado, menores valores de sobretensão são obtidos para incidências de descarga a meio de vão. De forma geral, tais sobretensões são aproximadamente 76% e 80% inferiores àqueles referentes à incidência no topo da torre para vãos de 400 m e 600 m, respectivamente.

Tabela 1 – Valor de pico de sobretensão na cadeia de isolador inferior

Vão	400 m			600 m		
Z_p (Ω)	10	20	40	10	20	40
Vp – incidência torre (kV)	495	619,7	850,1	507,5	639	887
Vp – incidência meio do vão (kV)	370,9	473,7	654,2	410,7	509,7	696
Razão Vp	0,75	0,76	0,77	0,81	0,80	0,78

A Tabela 2 indica o percentual de backflashover na torre para as incidências de descarga no topo da torre e no meio de vão em função do valor de Z_p , obtidos a partir da aplicação do método DE e a distribuição cumulativa dos picos de corrente de primeira descarga. É também apresentada a razão BFOR, definida como a relação entre a expectativa de backflashover devido à incidência no meio do vão e no topo da torre.

Tabela 2 – Percentual de ocorrência de backflashover em função do ponto de incidência de descarga.

Vão (m)	Z_p (Ω)	Incidência	% BFOR	Razão BFOR
400	10	Torre	7	-
		Meio de vão	4,3	0,61
	20	Torre	20,9	-
		Meio de vão	10,4	0,5
	40	Torre	45,6	-
		Meio de vão	23,6	0,52
600	10	Torre	7,9	-
		Meio de vão	6,7	0,85
	20	Torre	25,2	-
		Meio de vão	14,8	0,59
	40	Torre	54	-
		Meio de vão	32,3	0,6

Os resultados indicam a menor expectativa de ocorrência de backflashover para incidência de descarga no meio do vão. Razões BFOR de 0,6 a 0,5 e 0,85 a 0,6 são apresentadas para vãos de 400 m e 600 m, respectivamente, na faixa de impedância impulsiva de aterramento de 10 a 40 Ω .

4.3 Análise de desempenho da linha: incidência de descargas distribuídas ao longo do vão

O método de Monte Carlo foi implementado para simular a distribuição de incidência de descargas ao longo do vão da linha em estudo neste trabalho. A formulação do raio de atração (R_t) proposta em (2) e descrita na equação (2) ($R_{\text{atração}}$ em m e I em kA) foi adotada para a torre. Como não há um consenso na literatura em relação ao valor do raio de atração de cabos aéreos e do solo, seguindo a recomendação de (15), considerou-se o valor $0,9 \cdot R_{\text{atração}}$ para ambos.

$$R_{\text{atração}} = 10 \cdot I^{0,65} \text{ (m)} \quad (2)$$

As simulações consideraram a variação da altura dos condutores ao longo do vão, seguindo formulação tradicional da flecha de condutores aéreos (15).

A Figura 4 ilustra o percentual de incidência de descargas em diversos pontos ao longo do vão da linha como resultado da aplicação do método de Monte Carlo para os vãos de 400 m e 600 m de comprimento.

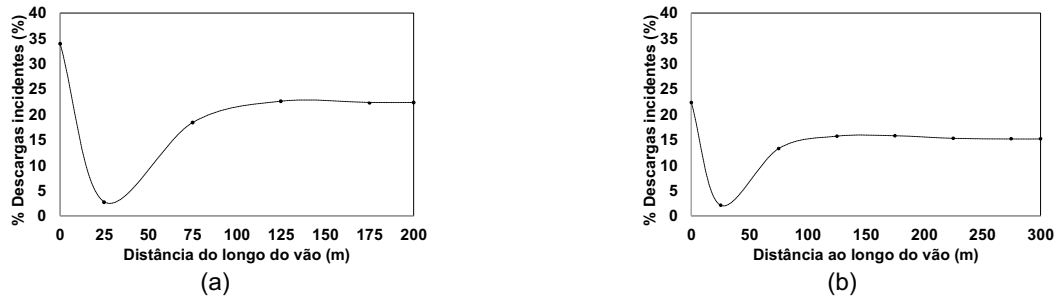


Figura 4 – Perfil de distribuição da incidência de descargas da torre (0 m) para o centro do vão. (a) vão de 400 m e (b) vão de 600 m.

Com base na distribuição de incidência de descarga ao longo do vão apresentada na Figura 4 e os percentuais de ocorrência de backflashover na torre para incidências de descargas em diversas seções ao longo do vão da LT, determinou-se a expectativa de backflashover da linha. Este resultado foi comparado com a expectativa de backflashover para a incidência de descargas concentradas na torre. A Tabela IV resume os resultados obtidos e os referentes fatores de vão para cada caso, definidos como a razão entre as expectativas de desempenho da linha para as incidências de descarga distribuída e na torre.

Tabela 3 - Fator de vão calculado para incidências distribuídas ao longo da linha.

Expectativa BFOR (%) [vão de 400 m]			
Zp (Ω)	Incidência na torre	Incidência distribuída	Fator de vão
10	10,8	9,1	0,85
20	29,2	23,7	0,81
40	56,2	46,9	0,83
Expectativa BFOR (%) [vão de 600 m]			
Zp (Ω)	Incidência na torre	Incidência distribuída	Fator de vão
10	11,8	11,0	0,93
20	33,8	28,3	0,84
40	64,1	55,1	0,86

Em todos os casos, os fatores de vão obtidos são superiores ao tradicional fator 0,6. No caso do vão 400 m, tais fatores foram 0,85, 0,81 e 0,84 para impedâncias impulsivas de aterramento de 10, 20 e 40 Ω , respectivamente. Para o vão 600 m, os fatores correspondentes são ainda maiores, 0,94, 0,84 e 0,86, respectivamente.

Estes resultados indicam que, para as condições analisadas, a adoção do tradicional fator multiplicador (0,6) para se determinar a taxa de backflashover da linha subestima a taxa de desligamentos da linha em relação à análise considerando a incidência distribuída de descargas ao longo do vão. A variação em relação ao cálculo mais elaborado é de aproximadamente 40%.

5.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma investigação da influência da distribuição de incidência de descargas ao longo do vão no cálculo da taxa de desligamentos por backflashover de linhas de transmissão, considerando uma configuração real de linha de transmissão de nível de tensão de 138 kV e a adoção de forma de onda de corrente representativa de primeira descarga. As análises baseadas em simulações sistemáticas considerando metodologia avançada de cálculo de desempenho HEM-DE e a abordagem por método de Monte Carlo para distribuição de incidência de descargas no vão da linha indicaram fatores de vão 30 a 40% superiores ao fator 0,6 tradicionalmente recomendado na literatura. Fatores da ordem de 0,81 e 0,84 foram obtidos para comprimentos de vão de 400 m e

600 m, respectivamente. Este tipo de resultado sugere a necessidade de cautela ao se utilizar o fator de vão 0,6 em estudos de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas, uma vez que tal valor subestimaria as taxas de desligamentos de LTs em relação à adoção de cálculos mais elaborados. Este resultado tem forte relevância para a engenharia de projeto e manutenção de linhas de transmissão, influenciando a análise de desempenho dos sistemas elétricos e a tomada de decisão quanto à proteção das linhas frente às descargas atmosféricas.

6.0 - AGRADECIMENTOS

Fernando Henrique Silveira agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo suporte financeiro (308351/2018-5 e TEC-PPM-00491-16, respectivamente). Silvério Visacro agradece ao CNPq pelo suporte financeiro (310564/2016-6). Rafael Maia Gomes agradece o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CIGRE WG 33-01, Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, Cigre Brochure 63, October 1991.
- (2) IEEE Std 1243, "Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines", 1997
- (3) S. Visacro, A. Soares Jr., HEM: a model for simulation of lightning-related engineering problems, IEEE Trans. Power Deliv. 20 (April (2)) (2005)1026-1028.
- (4) A. Hileman, Insulation coordination for power systems. Boca Raton, FL: CRC, 1999, pp. 627-640.
- (5) J.G. Anderson, "Monte Carlo Computer Calculation of Transmission-Line Lightning Performance," Trans. American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, Vol.80, Issue: 3, p.414-419, Aug. 1961.
- (6) V. Rakov, M.A. Uman, "Lightning – Physics and Effects," Cambridge University Press, 2003.
- (7) S. Visacro, "A representative curve for lightning current waveshape of first negative stroke," Geophys. Res. Lett., vol. 31, L07112, Apr. 2004.
- (8) F.H. Silveira, S. Visacro, A. DE Conti, "Lightning Performance of 138-kV Transmission Lines: The Relevance of Subsequent Strokes", IEEE Trans. Electromagn. Compat., v. 55, pp. 1195-1200, Dec. 2013.
- (9) S. Visacro, F.H. Silveira, "The Impact of the Frequency Dependence of Soil Parameters on the Lightning Performance of Transmission Lines", IEEE Trans. Electromagn. Compat., v. 57, p. 434-441, 2015.
- (10) S. Visacro, F.H. Silveira, "Lightning Performance of Transmission Lines: Requirements of Tower-Footing Electrodes Consisting of Long Counterpoise Wires", IEEE Trans. Power Del. vol. 31, no. 4, p. 1524-1532, Aug. 2016
- (11) F.H. Silveira and S. Visacro, Lightning Performance of Transmission Lines: Impact of Current Waveform and Front Time on Backflashover Occurrence," in press, DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2897892, 2019.
- (12) F.H. Silveira, S. Visacro, R.E. Souza, Lightning performance of transmission lines: Assessing the quality of traditional methodologies to determine backflashover rate of transmission lines taking as reference results provided by an advanced approach. ELECTRIC POWER SYSTEMS RESEARCH (JCR: 2,688), v.153, p.60 - 65, 2017.
- (13) A. De Conti and S. Visacro, "Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 49, no. 2, pp. 448-451, May 2007
- (14) R. B. Anderson and A. J. Eriksson, "Lightning parameters for engineering application," Electra, vol.69, pp. 65-102, 1980
- (15) A.M. Mousa and K.D. Srivastava, "The Distribution of Lightning Strokes to Towers and Along the Span of Shielded and Unshielded Power Lines", Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 115-122, 1990.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Fernando H. Silveira possui graduação (1999), mestrado (2001) e doutorado (2006) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). É professor associado do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG. Tem experiência na área de Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente na análise de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas, modelagem computacional dos efeitos de descargas para sistemas elétricos de potência, eletromagnetismo aplicado e proteção de sistemas elétricos. É autor ou coautor de mais de 30 artigos em periódicos e mais de 100 artigos em congressos internacionais e nacionais. É bolsista produtividade em pesquisa (nível 2) do CNPq, membro do IEEE e CIGRE e representante brasileiro dos grupos internacionais do CIGRE WG C4.37 e WG.C4.23, e secretário do GT4 BR01 (Desempenho de Linhas de Transmissão frente a Descargas Atmosféricas) do CIGRE-Brasil.