

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

AVALIAÇÃO DO EFEITO DOS PARÂMETROS DE CORRENTE DE DESCARGA MEDIDOS NO BRASIL NO DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

FERNANDO HENRIQUE SILVEIRA(1);FREDERICO SANTOS ALMEIDA(1);SILVERIO VISACRO FILHO(1)
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS(1)

RESUMO

Neste trabalho avalia-se o impacto dos parâmetros e da distribuição de correntes de descargas medidas no Brasil (estação do Morro do Cachimbo) no desempenho de LTs de 138 a 500 kV. Os resultados, comparados com aqueles resultantes da aplicação dos parâmetros e distribuições de corrente do CIGRE e IEEE, indicaram, para linhas de 138 kV, taxas de desligamento até 54% e 48% superiores àquelas provenientes das distribuições internacionais, para impedâncias de aterramento de 20 a 40 Ω . Por outro lado, taxas até 75%-18% e 84%-33% inferiores são apresentadas para linhas de 230 kV e 500 kV, respectivamente, na mesma faixa de impedâncias de aterramento.

PALAVRAS-CHAVE

Aterramentos elétricos, Backflashover, Desempenho de linhas frente a descargas, Distribuição cumulativa de corrente de descarga, Parâmetros de corrente de descarga

1.0 INTRODUÇÃO

A análise de desempenho de linhas de transmissão (LT) frente às descargas atmosféricas é um procedimento de engenharia 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.

A determinação do desempenho da linha está relacionada ao cálculo da corrente crítica (I_c), que é definida como o valor mínimo de corrente capaz de levar à ruptura do isolamento da cadeia de isoladores, e à estimativa da porcentagem das correntes incidentes na linha cujos valores sejam superiores à corrente crítica (1,2). Esse número corresponde ao percentual de descargas que levariam os isoladores ao backflashover e depende da distribuição acumulada dos picos de corrente empregada no procedimento de cálculo de desempenho.

Tradicionalmente, o cálculo desse desempenho considera parâmetros de corrente de descarga e distribuições dos picos de corrente baseados em dados de medição provenientes de regiões temperadas, mais especificamente os dados de medição de Monte San Salvatore (MSS), Suíça (3), recomendados pelos documentos de referência do CIGRE (4) e IEEE (5), amplamente adotados pelas empresas do setor elétrico, e também considerados no programa FLASH. No entanto, não existe um indicativo claro de que tais dados tenham aplicação genérica a qualquer região do mundo, como por exemplo a região tropical, na qual o Brasil se insere.

Os autores do trabalho estiveram envolvidos no grupo internacional do CIGRE WG C4.23, responsável pela atualização da brochura 63 do CIGRE (4). A nova brochura, denominada *Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines – New Aspects* (6), recomenda, sempre que disponível, o uso de dados e distribuições estatísticas locais para a realização de análises de desempenho de LTs.

Recentemente, os parâmetros e dados estatísticos relativos às correntes de descargas medidas na Estação do Morro do Cachimbo (MCS) em Belo Horizonte, Brasil, foram atualizados e publicados (7). Esta base de dados se constitui na única base de dados com significância estatística medida em regiões tropicais. Desta base de dados foram também obtidas expressões das correlações entre diversos parâmetros de corrente de descarga, além de expressões das distribuições cumulativas de pico de corrente de primeiras descargas e descargas subsequentes de aplicação direta em avaliações de desempenho de sistemas elétricos frente a descargas.

A análise dos dados provenientes da estação do Morro do Cachimbo revelam valores medianos e máximos dos picos de corrente de primeira descarga iguais a 43,3 kA e 153 kA, respectivamente. Tais valores são cerca de 40% e 70%

maiores do que os parâmetros correspondentes de regiões temperadas (31 kA e 90 kA referentes aos dados de Monte San Salvatore). Esta significativa diferença entre os dados medidos em regiões tropicais e temperadas tem potencial para afetar de forma relevante as estimativas de desempenho de linhas de transmissão instaladas no Brasil, e se constitui em um ponto que necessita de investigação.

É neste contexto que se insere este trabalho que tem como objetivo avaliar o efeito de se adotar os parâmetros de corrente e a distribuição cumulativa dos picos de corrente de primeira descarga medidos no Brasil no cálculo da taxa de desligamentos por backflashover em linhas de transmissão.

Os desenvolvimentos do trabalho consideram a aplicação de metodologia avançada de cálculo de desempenho baseada no uso de elaborado modelo computacional (HEM) (8) para o cálculo das sobretensões resultantes nos isoladores de linhas reais e a aplicação do método do efeito disruptivo (DE) (9) para definição de ocorrência de arco elétrico nos isoladores da linha devido a essas sobretensões. Para dar suporte às análises de sensibilidade realizadas, são consideradas configurações reais de linhas de transmissão de 138 kV, 230 kV e 500 kV em operação no Brasil e seus vãos típicos, a representação apurada dos aterramentos elétricos e a aplicação de ondas representativas de corrente de primeira descarga reais. No trabalho, considera-se a comparação dos desempenhos resultantes da aplicação dos parâmetros de descarga medidos na estação do Morro do Cachimbo e aqueles relativos aos parâmetros tradicionalmente utilizados neste tipo de análise, provenientes das medições de corrente em regiões temperadas.

2.0 PARÂMETROS DE DESCARGA MEDIDOS NO BRASIL PARA APLICAÇÃO EM ANÁLISES DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

2.1 A Estação do Morro do Cachimbo (MCS)

A estação do Morro do Cachimbo (MCS), em Belo Horizonte, operou de 1985 a 1998 e está operando continuamente desde 2008. A Figura 1 apresenta uma vista da estação, que compreende um mastro de 60 m de altura sustentado por fios isolantes para captação das descargas atmosféricas.

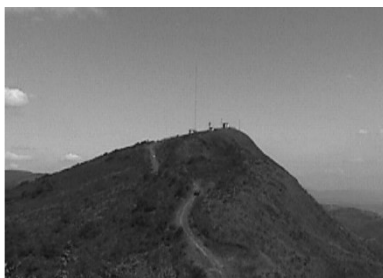


Figura 1 – Vista da Estação do Morro do Cachimbo (MCS) em Belo Horizonte.

Ao longo dos anos, uma vasta base de dados de corrente de descargas tem sido constituída. Atualmente, conta com o registro de 53 descargas negativas descendentes (53 registros de correntes de primeira descarga e 82 registros de descargas subsequentes), constituindo a única base de dados com significância estatística obtida em regiões tropicais.

2.2 Dados estatísticos e fórmulas de correlação e distribuição cumulativa dos picos de corrente

Os dados estatísticos das correntes de primeira descarga e descarga subsequente medidas na estação ao longo dos anos vêm sendo relatados na literatura por artigos científicos publicados em 2004 (10), 2012 (11) e 2020 (7), correspondendo a 31, 37 e 51 flashes medidos, respectivamente.

Os principais dados estatísticos atualizados referentes à medição de 53 primeiras descargas negativas descendentes são apresentados na Tabela 1. Nesta tabela, μ representa o valor mediano do parâmetro e β representa o desvio padrão logarítmico considerando uma distribuição lognormal. A comparação entre os principais parâmetros de corrente medidos nas estações Morro do Cachimbo (MCS) e Monte San Salvatore (MSS) para avaliações do desempenho de descargas atmosféricas das linhas de transmissão é apresentada na Tabela 2.

Como pode ser observado, os dados de corrente de descarga de MCS são caracterizados por valores mais elevados de primeiro pico (I_{p1}) e de pico de corrente (I_p), cerca de 36% e 39% superiores aos valores correspondentes de MSS. Em relação aos valores de tempo de frente, os parâmetros T_{d10} e T_{d30} relacionadas a MCS são maiores em 14% e 11%, respectivamente. Por outro lado, os valores medianos de tempo de meia onda (T_{50}) e derivada máxima da frente de onda (di/dt_{max}) de MCS são cerca de 25% e 15% menores do que aqueles referentes às medições de MSS, respectivamente.

Tabela1 – Dados estatísticos referente às primeiras correntes de descargas medidas na estação Morro do Cachimbo (MCS) [53 eventos].

Parâmetro	Aproximação pela distribuição lognormal	
	Valor mediano μ	Desvio padrão β
Ip_1 (kA)	37,6	0,46
Ip (kA)	43,3	0,47
Td_{10} (μ s)	6,4	0,41
Td_{30} (μ s)	4,2	0,50
T_{50} (μ s)	56,2	0,72
di/dt_{max} (kA/ μ s)	20,8	0,30
Carga (C)	5,7	0,63
Energia (A^2s) $\times 10^4$	9,93	1,21

Tabela 2 - Comparação entre os parâmetros medianos das primeiras correntes de retorno medidas nas estação Morro do Cachimbo (MCS) e Monte San Salvatore (MSS).

Parâmetro	MCS	MSS	Varição em relação a MSS (%)
Ip_1 (kA)	37,6	27,7	35,7
Ip (kA)	43,3	31,1	39,2
Td_{10} (μ s)	6,4	5,6	14,3
Td_{30} (μ s)	4,2	3,8	10,5
T_{50} (μ s)	56,2	75	-25,1
di/dt_{max} (kA/ μ s)	20,8	24,3	-14,4

Também em (7), são apresentadas expressões que correlacionam os valores de tempo de frente e valor de pico das correntes de primeira descarga, aqui reproduzidas na Tabela 3. A aplicação de tais expressões em análises de desempenho de linhas de transmissão é apresentada em (12).

Tabela 3 - Expressões de correlação entre o pico de corrente e o tempo de frente das primeiras correntes de descarga medidas na estação do Morro do Cachimbo (MCS).

Expressão	Coefficiente de correlação R
$Td_{10} = 0,65 \times (Ip_1)^{0,633}$	0,868
$Td_{30} = 0,25 \times (Ip_1)^{0,775}$	0,923
$Td_{10} = 1,03 \times (Ip)^{0,486}$	0,859
$Td_{30} = 0,21 \times (Ip)^{0,796}$	0,910

Os autores também propuseram em (7) expressões para obtenção direta das probabilidades cumulativas dos picos de corrente de primeira descarga e descarga subsequente, seguindo o mesmo formato matemático adotado pela tradicional expressão do IEEE. A equação (1) denota a expressão de MCS referente às primeiras correntes de retorno de descarga.

$$P_I = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{43,3}\right)^{3,8}} \quad (1)$$

3.0 DISTRIBUIÇÕES CUMULATIVAS DE PICO DE CORRENTE DE DESCARGA TRADICIONALMENTE UTILIZADAS EM ANÁLISES DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

A principal base de dados de correntes de descargas apresentada na literatura se refere às medições de Berger, em Monte San Salvatore, na Suíça (3). Trata-se da maior base de dados obtida a partir de medições diretas em uma torre instrumentada instalada em regiões temperadas. Esta base de dados é constituída por 101 primeiras descargas negativas descendentes, 135 descargas negativas subsequentes e 26 descargas positivas (13).

A literatura apresenta distribuições ampliadas de picos de corrente tradicionalmente aplicadas em avaliações de desempenho de linhas de transmissão, compostas principalmente pelos dados de Monte San Salvatore, e complementados por dados obtidos a partir de medições indiretas utilizando elos magnéticos que têm menor nível de exatidão (13). As incertezas decorrentes da inclusão desses dados de qualidade questionável para formar essas distribuições ampliadas são discutidas em (13).

Duas distribuições ampliadas apresentam maior destaque em estudos de desempenho de linhas de transmissão: as distribuições do CIGRE (4) e do IEEE (5). A distribuição ampliada proposta pelo CIGRE considera 408 dados de medição, sendo tradicionalmente representada por meio de duas distribuições em função do valor de corrente I e os seguintes parâmetros: $\mu = 61$ kA, $\beta = 1,33$ (para $I < 20$ kA) e $\mu = 33,3$ kA, $\beta = 0,605$ (para $I \geq 20$ kA). A distribuição do IEEE é representada pela equação (2), e, segundo (13), considera além dos dados de medição das descargas negativas de Monte San Salvatore, dados de descargas positivas e ascendentes. As distribuições do CIGRE e IEEE se aplicam a valores de corrente até 200 kA.

$$P_I = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2,6}} \quad (2)$$

A Figura 2 apresenta a comparação entre as curvas das distribuições cumulativas de primeira descarga do CIGRE, IEEE e MCS. É importante notar a mudança de comportamento dessas distribuições a partir da faixa entre 95 kA-105 kA. Para correntes inferiores a estes valores, a distribuição MCS é caracterizada por valores mais elevados de probabilidade cumulativa. No entanto, para correntes superiores a tal faixa de corrente, este comportamento se altera e as distribuições do CIGRE e IEEE passam a apresentar valores maiores de probabilidade cumulativa.

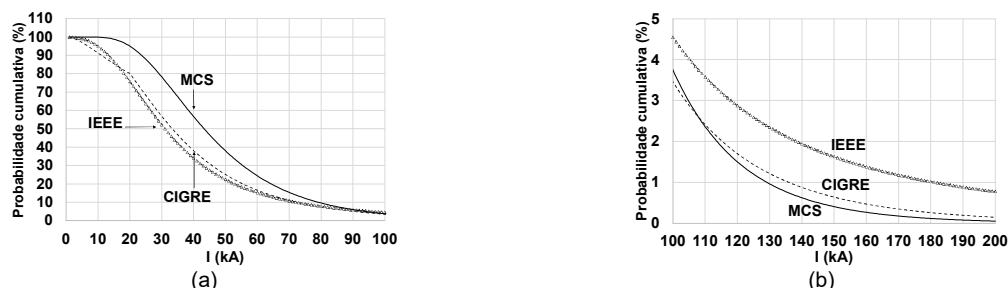


Figura 2 - Distribuições de picos de corrente de primeira descarga: CIGRE, IEEE e Morro do Cachimbo (MCS). Considerando um determinado valor de corrente, o gráfico indica o percentual de correntes com valores superiores ao valor especificado. (a) até 100 kA, (b) 100 a 200 kA.

4.0 DESENVOLVIMENTOS

As avaliações deste trabalho foram desenvolvidas com base em resultados de simulações computacionais considerando o modelo HEM (*Hybrid Electromagnetic Model*) (8) para o cálculo das sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores das linhas devido à incidência de descarga no topo da torre e o método do efeito disruptivo (DE) para se estimar a ocorrência de backflashover em tais isoladores (9).

O modelo HEM é um modelo eletromagnético tradicionalmente utilizado para o cálculo da resposta de sistemas elétricos frente às descargas atmosféricas, com destacada aplicação no cálculo das sobretensões nas cadeias de isoladores de LTs. Os detalhes deste modelo e de sua aplicação, bem como a sua validação com base em resultados experimentais, são apresentados em diversas publicações da literatura (8,14-15). Apesar de implicar maior tempo de processamento, a aplicação desse modelo possibilita gerar resultados mais precisos e de validade generalizada em relação aos obtidos por modelagens com abordagem analítica ou de representação por parâmetros de circuitos. A representação do sistema físico é realizada diretamente a partir da geometria dos condutores envolvidos e das constantes dos meios nos quais estes estão imersos, sendo que a solução do problema já contempla automaticamente os complexos acoplamentos eletromagnéticos e os efeitos de propagação.

O método DE considera a integração da forma de onda da sobretensão resultante na cadeia de isoladores da linha durante o intervalo de tempo no qual esta excede um determinado valor limite de tensão para se determinar a ocorrência (ou não) de backflashover na cadeia de isoladores, e, conseqüentemente, o valor de corrente crítica.

As avaliações deste trabalho consideram três configurações reais de linhas de transmissão de nível de tensão de 138 kV, 230 kV e 500 kV, tipicamente utilizadas no Brasil. Tais linhas apresentam CFO (tensão de 50%) de 650 kV, 1200 kV e 1800 kV, respectivamente. As torres dessas linhas são do tipo autoportante conforme ilustrado de forma simplificada na Figura 3.

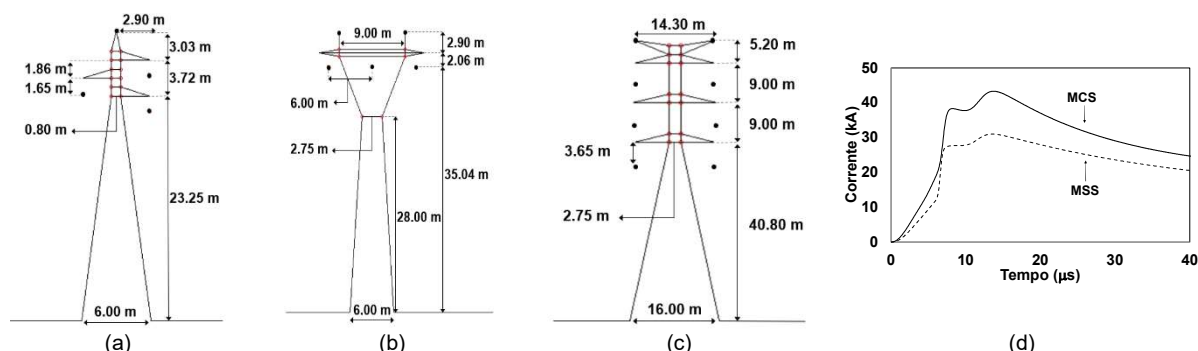


Figura 3 – Representação simplificada da configuração das torres das linhas de transmissão de 138 kV (a), 230 kV (b) e 500 kV (c). Formas de onda de corrente com parâmetros medianos do Morro do Cachimbo (MCS) e Monte San Salvatore (MSS) (d).

A torre de 138 kV tem 30 m de altura e possui um cabo de blindagem e arranjo triangular das cadeias de isoladores. A torre de 230 kV tem 40 m de altura e possui dois cabos de blindagem e arranjo horizontal das cadeias de isoladores. A torre de 500 kV tem 64 m de altura e possui dois cabos de blindagem, circuito duplo com arranjo vertical das cadeias de isoladores. As simulações consideraram comprimentos típicos de vãos para cada nível de tensão de

linha: 400 m (linhas de 138 kV e 230 kV) e 500 m (linha de 500 kV). Os raios dos cabos de blindagem e fase são de 0,4 cm e 1,13 cm, respectivamente.

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 (15), 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 Ω e 80 Ω .

A forma de onda da corrente de retorno foi representada pela corrente do tipo duplo pico (16) com parâmetros medianos associados às correntes de primeiras descargas negativas descendentes medidas nas estações do Morro do Cachimbo (MCS) e Monte San Salvatore (MSS), conforme ilustrado na Figura 3(d). Essa representação de corrente reproduz características importantes das formas de onda de corrente reais medidas como a frente de onda côncava e a presença de picos secundários.

Uma vez determinada a corrente crítica e com base nas distribuições cumulativas dos picos de corrente do Morro do Cachimbo, CIGRE e IEEE, determina-se a porcentagem das correntes incidentes na linha cujos valores são superiores à corrente crítica. Esse número corresponde ao percentual de descargas na linha que levariam os isoladores ao backflashover.

5.0 RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 Sobreensões nas cadeias de isoladores das LTs

A Figura 4 apresenta as sobreensões resultantes nas cadeias de isoladores críticas das linhas de transmissão de 138 kV, 230 kV e 500 kV, considerando valor de impedância impulsiva de aterramento de 20 Ω . A Tabela 4 indica os valores de pico de tensão para valores de Z_p entre 10 e 80 Ω .

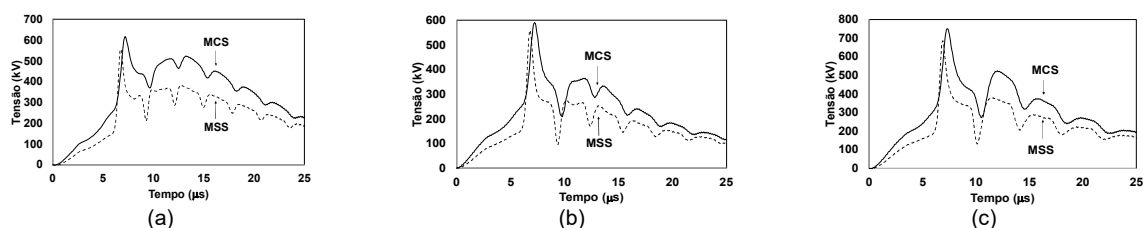


Figura 4 - Sobreensões nas cadeias de isoladores das LTs de 138 kV (a), 230 kV (b) e 500 kV (c) para Z_p de 20 Ω .

Tabela 4 – Valores de pico de sobreensão nas cadeias de isoladores críticas das LTs de 138 kV, 230 kV e 500 kV.

Linha	Z_p (Ω)	Vp (kV) - MCS	Vp (kV) - MSS	Variação em relação a MSS (%)
138 kV	10	473,3	470,8	0,5%
	20	617,2	555,0	11,2%
	40	1043	846,4	23,2%
	80	1655,2	1255	31,9%
230 kV	10	465,6	480	-3,0%
	20	589,4	558,8	5,5%
	40	798,6	685,3	16,5%
	80	1126,3	893,8	26,0%
500 kV	10	592,8	584,0	1,5%
	20	749,8	685,7	9,4%
	40	1030,2	855,9	20,4%
	80	1493,4	1145,6	30,4%

Em geral, os valores de sobreensão associados aos parâmetros medianos de corrente do Morro do Cachimbo são maiores. Diferenças da ordem de 11% a 32%, 6% a 26% e 9% a 30% para linhas de 138, 230 e 500 kV, respectivamente, considerando valores de impedância de pé-de-torre entre 20 Ω e 80 Ω , são observadas. Para impedâncias de pé-de-torre de 10 Ω , os valores de pico de sobreensão associados a ambas as formas de onda de corrente são praticamente os mesmos.

O comportamento observado se justifica pelo efeito predominante do valor de pico de corrente no estabelecimento da sobreensão resultante, uma vez que as formas de onda das correntes MCS e MSS apresentam tempos de frente medianos muito semelhantes (4,2 μ s e 3,8 μ s, respectivamente, uma diferença de apenas 10%), em contraste com o valor mediano de pico de corrente de MCS que é 40% maior do que o valor mediano de corrente de MSS (43,3 kA x 31 kA).

5.2 Correntes críticas

Com base nas sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores das LTs simuladas, os valores de corrente crítica em função da impedância de pé-de-torre foram calculados, considerando a aplicação do método do efeito disruptivo (DE) com parâmetros sugeridos em (9). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.

É importante denotar que em todos os casos simulados, as correntes críticas relacionadas aos parâmetros medianos do Morro do Cachimbo são maiores. As diferenças observadas são de cerca de 3% a 7%, 5% a 14% e 5 a 11% superiores, para as linhas de 138 kV, 230 kV e 500 kV, respectivamente, na faixa simulada para as impedâncias de aterramento. As maiores diferenças estão relacionadas ao caso de impedância impulsiva de pé-de-torre de 10 Ω .

Tabela 5 – Correntes críticas estimadas para as LTs de 138 kV, 230 kV e 500 kV.

Linha	Zp (Ω)	Ic (kA) - MCS	Ic (kA) - MSS	Variação em relação a MSS (%)
138 kV	10	94,83	88,66	7,0%
	20	57,16	55,49	3,0%
	40	34,21	32,55	5,1%
	80	21,65	20,77	4,2%
230 kV	10	210,87	185,38	13,8%
	20	143,32	132,37	8,3%
	40	93,96	88,97	5,6%
	80	61,92	59,21	4,6%
500 kV	10	238,15	214,21	11,2%
	20	160,21	150,04	6,8%
	40	103,05	97,65	5,5%
	80	67,12	64,17	4,6%

5.3 Estimativa do percentual de ocorrência de backflashover e análise da influência das distribuições cumulativas dos picos de corrente

Considerando as distribuições cumulativas de pico de corrente de primeira descarga do Morro do Cachimbo (MCS), CIGRE e IEEE e os resultados de corrente crítica apresentados na Tabela 5, determinou-se o desempenho da torre atingida pela descarga em termos do percentual de backflashover em função do valor da impedância impulsiva de pé-de-torre. Esse percentual corresponde ao percentual de correntes que excederiam o valor da corrente crítica para cada condição de aterramento. A Figura 5 ilustra o comportamento do desempenho em função da impedância de pé-de-torre e a Tabela 6 apresenta os valores específicos de percentual de backflashover para impedâncias de pé-de-torre de 10 a 80 Ω . O cálculo dos desempenhos referentes a MCS considerou à aplicação da distribuição lognormal ($\mu = 43,3$ kA, $\beta = 0,47$) e da fórmula dada pela equação (1).

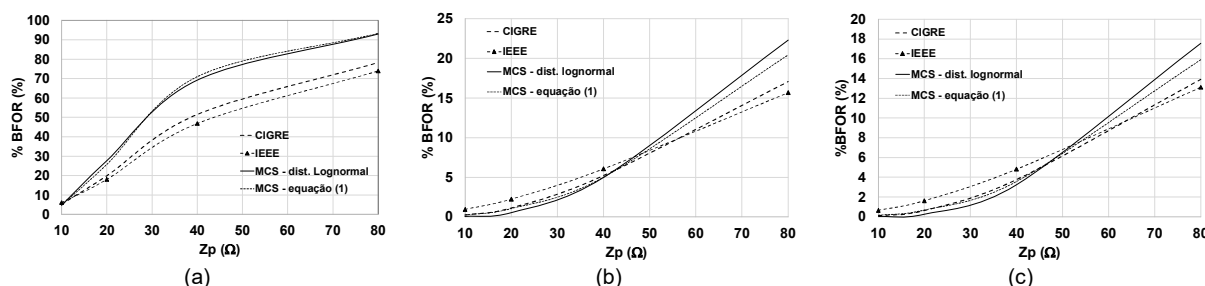


Figura 5 – Comportamento do percentual de ocorrência de backflashover (%BFOR) em função do valor da impedância impulsiva de pé-de-torre para as linhas de transmissão de 138 kV (a), 230 kV (b) e 500 kV (c).

Tabela 6 – Percentual de backflashover para LTs de 138 kV, 230 kV e 500 kV considerando as distribuições cumulativas do CIGRE, IEEE e MCS (distribuição lognormal e equação (1)). Os maiores percentuais para cada caso estão marcados em negrito.

Linha	Zp (Ω)	%BFOR			
		CIGRE	IEEE	MCS	
				Dist. lognormal	Equação (1)
138 kV	10	5,28	6,11	4,77	4,84
	20	19,93	18,04	27,73	25,83
	40	51,50	46,83	69,19	71,01
	80	78,24	73,91	92,99	93,30
230 kV	10	0,23	0,95	0,04	0,24
	20	1,13	2,24	0,54	1,05
	40	5,21	6,06	4,96	5,00
	80	17,07	15,68	22,33	20,44
500 kV	10	0,10	0,65	0,01	0,15

	20	0,64	1,63	0,27	0,69
	40	3,77	4,82	3,25	3,57
	80	13,91	13,11	17,55	15,90

A comparação de resultados indica diferenças importantes para o desempenho de tais linhas, podendo afetar a tomada de decisão quanto à necessidade de implementação de melhorias para garantir o desempenho das linhas segundo aos parâmetros estipulados pela ANEEL e pelo ONS. Estas diferenças estão associadas ao nível de tensão da linha e ao comportamento das distribuições para a região próxima aos valores medianos e para a região de correntes elevadas.

A análise para a linha de 138 kV revela percentuais de ocorrência de backflashover subestimados em praticamente toda a faixa de impedâncias impulsivas de pé-de-torre quando são adotadas as distribuições de corrente do CIGRE e do IEEE em comparação com os resultados referentes à distribuição MCS: taxas de backflashover aproximadamente 39%, 34% e 19% superiores em relação ao CIGRE e 54%, 48% e 26% superiores em relação ao IEEE para impedâncias impulsivas de pé-de-torre de 20, 40 e 80 Ω , respectivamente, são obtidas quando se considera a distribuição MCS. Apenas para 10 Ω , os percentuais de backflashover associados a MCS são inferiores: -10% e -22% em relação ao CIGRE e IEEE, respectivamente.

Por outro lado, o comportamento para as linhas de mais alta tensão, como 230 kV e 500 kV indica que o uso das distribuições do CIGRE e IEEE superestima a taxa de backflashover das LTs para valores baixos a intermediários de Zp. Considerando a linha de 230 kV, as taxas de backflashover associadas ao uso da distribuição MCS são aproximadamente 83%, 52% e 5% inferiores em relação ao CIGRE, e 96%, 76% e 18% inferiores em relação ao IEEE para impedâncias impulsivas de pé-de-torre de 10, 20 e 40 Ω , respectivamente. Para a linha de 500 kV, as taxas obtidas são 86%, 58% e 14% inferiores em relação ao uso da distribuição do CIGRE e 98%, 84% e 33% inferiores em relação ao uso da distribuição do IEEE. Para Zp de 80 Ω , os percentuais de backflashover associados a MCS são superiores em relação ao CIGRE e IEEE: +31% e +42% (linha de 230 kV) e + 26% e +34% (linha de 500 kV).

A análise dos resultados também revela os valores limites de impedância de pé-de-torre a partir dos quais as distribuições do CIGRE e IEEE, respectivamente, passam a subestimar as taxas de backflashover das linhas de 230 kV e 500 kV. Tais valores são 43 Ω e 47 Ω (230 kV) e 47 Ω e 52 Ω (500 kV).

O comportamento dos desempenhos apresentados pode ser explicado pelo perfil das distribuições da Figura 2. A Figura 2 mostra que a distribuição MCS apresenta maiores valores de probabilidade cumulativa para correntes até aproximadamente 100 kA. E é justamente abaixo desse valor que se enquadram as correntes crítica estimadas para a LT de 138 kV considerando impedâncias impulsivas de pé-de-torre acima de 20 Ω . Na região de 30 kA a 60 kA, que representa correntes críticas para a faixa de 40 Ω a 20 Ω , os valores de probabilidade cumulativa de MCS são cerca de 40% a 50% maiores do que os referentes às distribuições do CIGRE e IEEE.

Ainda com base na Figura 2, nota-se que a distribuição MCS apresenta menores valores de probabilidade cumulativa para correntes muito elevadas, região que está associada ao desempenho de LTs de 230 kV para Zp abaixo de 20 Ω e de 500 kV para Zp abaixo de 40 Ω , aproximadamente. A análise de desempenho para essas condições deve ser realizada com cautela pelo fato da literatura reportar poucos dados de medição de correntes de descarga nesta faixa superior. A base de dados de Monte San Salvatore considerada nas distribuições do CIGRE e IEEE não conta com medições de corrente de descarga negativa descendente superior a 90 kA. Por outro lado, vale denotar que a distribuição MCS é a única que apresenta resultados de medição confiável (em torre instrumentada) para correntes elevadas acima de 90 kA (ao menos 3 eventos: 90 kA, 144 kA e 153 kA).

5.4 Recomendação quando da aplicação da distribuição MCS

Os resultados apresentados na Figura 5 e Tabela 6 também indicaram a diferença entre os percentuais de backflashover obtidos utilizando-se a distribuição lognormal de MCS e a equação (1). A diferença entre esses resultados se mostrou mais importante para as linhas de 230 kV e 500 kV, e os casos referentes a valores de corrente crítica superiores a 95 kA. A Figura 6(a) apresenta a comparação entre os valores de probabilidade cumulativa fornecidos pela distribuição lognormal de MCS e pela equação (1). Nota-se claramente a diferença entre esses valores para esta faixa de corrente, que é de maior relevância para as análises de desempenho de linhas de nível de tensão a partir de 230 kV. O uso da equação (1) para essas condições superestima a taxa de desligamentos dessas LTs.

Considerando o comportamento da distribuição denotado na Figura 6(a), neste trabalho é proposta uma fórmula complementar para consideração da distribuição cumulativa de MCS. A fórmula, descrita pela equação (3) com decaimento exponencial, reproduz com melhor qualidade a distribuição MCS para valores de corrente I superiores a 95 kA, conforme ilustrado pela comparação com a distribuição lognormal na Figura 6(b).

$$P_I = 352e^{-0,0454 \times I} \quad (3)$$

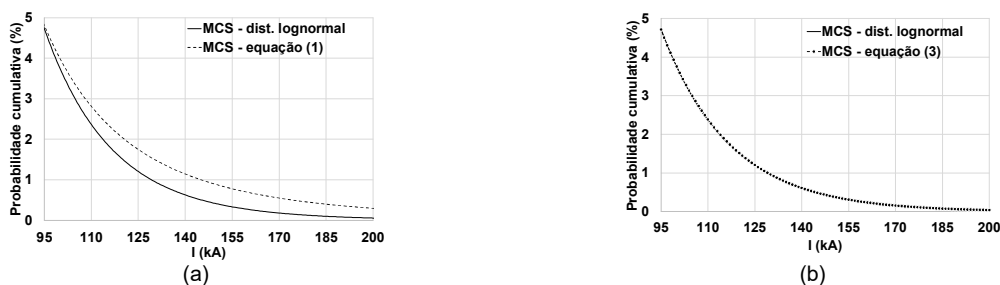


Figura 6 – Distribuição cumulativa dos picos de corrente de primeira descarga de MCS para correntes acima de 95 kA. (a) Distribuição lognormal e distribuição dada pela equação (1). (b) Distribuição lognormal x distribuição dada pela equação (3).

A fórmula descrita pela equação (3) tem validade a partir de 53 kA, e, portanto, engloba os valores de corrente crítica de LTs de 230 kV e 500 kV. Sendo assim, os autores apresentam 2 recomendações quanto ao uso das equações (1) e (3) para análises de desempenho de linhas de transmissão considerando a distribuição dos picos de corrente de MCS:

- Recomendação 1 (quanto ao valor da corrente): Equação (1) para $I < 95$ kA e equação (3) para $I \geq 95$ kA;
- Recomendação 2 (quanto ao nível de tensão da LT): Equação (1) para LTs de 138 kV e equação (3) para LTs de 230 kV e 500 kV.

6.0 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma investigação referente ao efeito de se adotar os parâmetros de corrente e a distribuição cumulativa dos picos de corrente de primeira descarga medidos no Brasil no cálculo de desempenho frente a descargas atmosféricas de linhas de transmissão de 138 kV, 230 kV e 500 kV. As análises baseadas em simulações computacionais sistemáticas considerando metodologia avançada de cálculo de desempenho HEM-DE assumiram a distribuição dos picos de corrente do Morro do Cachimbo (MCS), Belo Horizonte, e as distribuições tradicionais do CIGRE e IEEE.

Os resultados apresentados no trabalho em termos do percentual de backflashover indicaram que a utilização das distribuições do CIGRE e IEEE que consideram, principalmente, dados de descarga medidos em Monte San Salvatore, na Suíça, subestimam as taxas de desligamento de linhas de 138 kV. O uso da distribuição MCS do Brasil resulta em taxas de desligamento 40% a 34% e 54% a 48% superiores aos resultados provenientes do uso das distribuições do CIGRE e IEEE, respectivamente, para faixa de impedância impulsiva de pé-de-torre de 20 Ω a 40 Ω . Por outro lado, o uso dessas distribuições resulta em taxas de desligamento superestimadas para as LTs de 230 kV (com Z_p aproximadamente menor que 45 Ω) e 500 kV (com Z_p aproximadamente menor que 50 Ω). Isto ocorre pelo fato das distribuições do CIGRE e IEEE superestimarem o percentual de correntes elevadas, a despeito dessas distribuições se basearem em dados de correntes medidas em torre instrumentada que não ultrapassam o valor de 90 kA. Neste contexto, é importante destacar que a distribuição MCS é a única que apresenta resultados de medição confiável (em torre instrumentada) para correntes elevadas acima de 90 kA (ao menos 3 eventos: 90 kA, 144 kA e 153 kA).

O trabalho também apresentou uma nova fórmula para reprodução da distribuição dos picos de corrente de MCS para correntes elevadas, de interesse, principalmente, para as análises de desempenho de LTs de 230 kV e 500 kV.

Os resultados apresentados neste trabalho têm forte relevância para a engenharia de projeto e manutenção de linhas de transmissão, influenciando o diagnóstico de desempenho das LTs e a definição das práticas de proteção a serem empregadas para a melhoria de seu desempenho frente às descargas atmosféricas.

7.0 AGRADECIMENTOS

Fernando Henrique Silveira e Silvério Visacro agradecem ao (CNPq) pelo suporte financeiro (308351/2018-5 e 307381/2019-6, respectivamente). Frederico Santos Almeida agradece o apoio da CAPES pelo suporte financeiro (88887.627303/2021-00). O desenvolvimento deste trabalho teve, em parte, financiamento do programa de P&D da ANEEL por meio de projeto desenvolvido em parceria da UFMG com a AETE e TAESA.

8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) F.H. Silveira, F. H.; S. Visacro, R.E. Souza, "Avaliação De Desempenho De Linhas De Transmissão Frente Às Descargas Atmosféricas: Análise Da Qualidade Dos Resultados Das Metodologias De Cálculo. In: XXIII SNPTTE, 2015, Foz Do Iguaçu.
- (2) F.H. Silveira, F. H.; 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, v. 153, p. 60-65, 2017.
- (3) K. Berger, R. B. Anderson, and H. Kroninger, "Parameters of lightning flashes", Electra, vol. 80, pp. 223-237, 1975

- (4) Cigre Brochure 63 - Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, Oct. 1991
- (5) IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE Standard 1243-1997, Dec. 1997.
- (6) Cigre Brochure 839, Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines – New Aspects, Junho, 2021.
- (7) F.H. Silveira, and S. Visacro, "Lightning Parameters of a Tropical Region for Engineering Application: Statistics of 51 Flashes Measured at Morro do Cachimbo and Expressions for Peak Current Distributions," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 62, no. 4, pp. 1186 - 1191, Aug. 2020.
- (8) S. Visacro, A. Soares J., "HEM: A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems", IEEE Trans. Power Del., vol.20, no.2, pp. 1026-1208, Apr. 2005
- (9) A. H. Hileman, "Insulation Coordination for Power Systems". Boca Raton, FL: CRC, 1999, pp. 627-640
- (10) S. Visacro, M. A. O. Schroeder, A. Soares Jr., L. L. C. Cherchiglia, V. J. Souza, "Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station," J. Geophys. Res., vol. 109, 2004, Art. no. D01105.
- (11) S. Visacro, C. Mesquita, A. de Conti, F. H. Silveira, "Updated statistics of lightning currents measured at Morro do Cachimbo station," Atmospheric Res., vol. 117, pp. 55–63, 2012.
- (12) F.H. Silveira, F.S. Almeida, S. Visacro, G.M.P. Zago. Influence of the current front time representation on the assessment of backflashover occurrence of transmission lines by deterministic and probabilistic calculation approaches. Electric Power Systems Research, v. 197, p. 107299, 2021.
- (13) Cigre Brochure 549, Lightning Parameters for Engineering Applications, Aug. 2013.
- (14) F. H. Silveira and S. Visacro, "Lightning performance of transmission lines: Impact of current waveform and front time on backflashover occurrence," IEEE Trans. Power. Del., 2019, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2897892.
- (15) 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, pp. 1524-1532, Aug. 2016
- (16) 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.

DADOS BIOGRÁFICOS



Fernando Silveira possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela UFMG. É professor associado do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG e pesquisador do LRC. Atua principalmente na análise de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas, modelagem computacional dos efeitos de descargas, eletromagnetismo aplicado e proteção de SEP. É autor ou coautor de mais de 40 artigos em periódicos e mais de 100 artigos em congressos internacionais e nacionais. É membro sênior do IEEE, membro do CIGRE e secretário do grupo internacional B2/C4.76 Lightning & Grounding Considerations For Overhead Line Rebuilding and Refurbishing Projects.

(2) **FREDERICO SANTOS ALMEIDA**
 Frederico Santos Almeida possui graduação (2014) e mestrado (2020) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Desde de 2020 é aluno de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG. Realiza pesquisas na área de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, modelagem computacional e aterramentos elétricos. É bolsista CAPES nível de doutorado.

(3) **SILVERIO VISACRO FILHO**
 Silvério Visacro (1956 – Belo Horizonte) tem graduação, mestrado e doutorado (1992) em Eng. Elétrica. Prof. Titular do Depto Eng. Elétrica da UFMG, é pesquisador e consultor nas áreas de Descargas Atmosféricas, Aterramentos Elétricos e Desempenho de Linhas de Transmissão frente a Descargas Atmosféricas. Autor de 2 livros, 4 capítulos de livro e mais de 400 artigos nesses temas. É IEEE Fellow e teve muitas distinções (p.ex. "IEEE Kanda Award 2016", "ICLP Karl Berger Award 2016" e inclusão nos 2% de cientistas de maior influência no mundo -pesquisa da Univ. Stanford de 2020). Convenor: CIGRE WGs C4.06 e C4.33.