



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GDS/14
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS

**AValiação de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas:
ANÁLISE DA QUALIDADE DOS RESULTADOS DAS METODOLOGIAS DE CÁLCULO**

Fernando H. Silveira(*) Silvério Visacro Ronaldo E. de Souza Filho
LRC – Lightning Research Center
UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO

Este trabalho apresenta uma discussão relativa às metodologias tradicionais de cálculo de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas apresentadas pelo CIGRÉ e pelo IEEE. Tais metodologias são amplamente utilizadas pelas empresas do setor elétrico. Os principais aspectos destas metodologias são discutidos, com destaque para as aproximações adotadas no cálculo da taxa de desligamentos de linhas por backflashover. Simulações sistemáticas foram realizadas considerando uma linha real de classe de tensão de 138 kV. Os resultados obtidos apontaram valores distintos de taxas de desligamento, sendo a metodologia do IEEE aquela que apresentou os menores valores. Além disso, a comparação destes resultados com aqueles obtidos pela aplicação de metodologia mais avançada e consistente (HEM-DE) que considera o uso de modelo eletromagnético para cálculo das sobretensões nos isoladores da linha e critério mais elaborado para análise da ruptura do isolamento desses isoladores indicaram a significativa variação das taxas de desligamentos obtidas pelas metodologias tradicionais. Para as condições simuladas, as taxas calculadas pelas metodologias do CIGRÉ e do IEEE foram aproximadamente 60% maior e 40 % menor em comparação com a aplicação da metodologia HEM-DE.

PALAVRAS-CHAVE

Desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, Metodologias de cálculo de desempenho, Descargas Atmosféricas, Aterramentos elétricos, Critério para avaliação de disrupção elétrica.

1. INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas se constituem na principal fonte de desligamentos não-programados das linhas de transmissão. Estes desligamentos se processam basicamente por três mecanismos, sendo eles o *Flashover*, o *Backflashover* e a descarga a meio de vão. Nas condições de solo brasileiras, caracterizadas por valores elevados de resistividade do solo, prevalece amplamente o mecanismo de *backflashover* (1,2).

A avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas é realizada com base na taxa de desligamentos da linha por 100 km por ano. O cálculo desta taxa consiste em procedimento de extrema complexidade no qual uma gama extensa de variáveis é capaz de afetar o resultado final. A correta especificação dessa taxa é fundamental para determinação do tipo de prática de proteção a ser implementada em linhas de transmissão já em operação ou ainda em fase de concessão.

A literatura técnica da área apresenta diversas metodologias para estimar as taxas de desligamento de linhas frente às descargas atmosféricas. Dentre elas destacam-se as metodologias que consideram um conjunto de formulações analíticas desenvolvidas pelo Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos (CIGRÉ, do francês *Conseil International des Grands Réseaux Électriques*) e pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE, do inglês *Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Estas duas metodologias de

(*) Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha – CEP 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil
Tel: (+55 31) 3409-3415 – Fax: (+55 31) 3409-5455 – Email: silveira@cpdee.ufmg.br

avaliação de desempenho são amplamente utilizadas pelas empresas do setor elétrico em decorrência da simplicidade dos seus cálculos e sua facilidade de aplicação.

Tais metodologias adotam diversas aproximações, nem sempre sendo comprovada a generalidade de suas aplicações. Dentre as simplificações adotadas, destacam-se a modelagem do transitório eletromagnético em torres e condutores da linha, a modelagem do comportamento impulsivo dos aterramentos elétricos das torres (representados por resistências), a representação da forma de onda da corrente de descarga (considerada com crescimento linear e constante) e o critério para aferição da disrupção elétrica ao longo das cadeias de isoladores das linhas (geralmente baseado apenas no valor de pico da sobretensão).

Este conjunto de simplificações e aproximações tem potencial para interferir nos resultados apresentados por tais metodologias, modificando a taxa calculada de desligamentos por 100 km de linha ao ano. Como consequência, tais simplificações resultam em avaliação errôneas de desempenho das linhas de alta tensão, influenciando na tomada de decisão referente à sua proteção.

Neste contexto se insere o presente trabalho que tem como objetivo apresentar e discutir os principais aspectos das metodologias do CIGRÉ e IEEE para avaliação de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas, em termos da ocorrência de *backflashover* e avaliar o impacto de determinados parâmetros no índice que mensura tal desempenho. Além disso, pretende-se apontar as diferenças destas metodologias, comparando seus resultados com aqueles obtidos pela aplicação de metodologia consistente e avançada baseada no uso de elaborado modelo computacional (HEM) para o cálculo das sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores de linhas reais e aplicação do método da integração (DE) para definição de ocorrência de arco elétrico entre os isoladores da linha devido a essas sobretensões.

Para suportar as análises de sensibilidade apresentadas neste trabalho, simulações computacionais foram desenvolvidas considerando uma configuração real de linha de transmissão de nível de tensão de 138 kV em operação no Brasil.

2. METODOLOGIAS TRADICIONAIS DE CÁLCULO DE DESEMPENHO DE LT'S

2.1 Visão Geral

As metodologias do CIGRÉ e do IEEE para o cálculo de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas consideram desenvolvimentos analíticos que buscam transcrever de forma simplificada o comportamento transitório das sobretensões resultantes pela incidência direta de descargas na linha. Uma série de trabalhos apresentados na literatura ao longo dos anos contribuiu para o desenvolvimento das formulações e simplificações adotadas. Os detalhes principais de cada uma dessas metodologias estão compilados em (3) (metodologia do CIGRÉ) e em (4-6) (metodologia do IEEE). Maiores informações podem ser obtidas em (7).

De forma geral, componentes do sistema como torres, cabos para-raios e cabos fase são modelados por impedâncias de surto, enquanto os aterramentos elétricos são modelados por resistências. Com base em formulações analíticas que consideram os efeitos de reflexões nos aterramentos das torres da linha, promove-se o cálculo das sobretensões desenvolvidas nas cadeias de isoladores devido a incidência direta de descarga na linha. A partir das sobretensões resultantes, é realizada a avaliação da corrente crítica de descarga que resultaria em sobretensão capaz de provocar a ruptura do isolamento da linha. Finalmente, distribuições de probabilidade acumulada das amplitudes de corrente de descargas são utilizadas para se estimar o número de desligamentos da linha.

É importante destacar que os desenvolvimentos atuais das metodologias do CIGRÉ e do IEEE consideram o cálculo das taxas de desligamento por *backflashover* associados apenas à incidência de primeiras descargas negativas em linhas. Entretanto, alguns trabalhos recentes têm indicado a possibilidade de ocorrência de *backflashover* também por descargas subsequentes (8,9).

2.2 Modelagem e Principais Aproximações Adotadas

a) Componentes do sistema

Ambas as metodologias representam a torre e os condutores da linha de transmissão por meio de suas respectivas impedâncias de surto. A metodologia do IEEE, especificamente, ainda permite que o efeito corona em torno dos condutores seja representado.

O aterramento elétrico das torres é modelado como uma resistência de valor referente ao obtido por medição em baixa frequência e para baixas amplitudes de corrente. Ambas metodologias permitem a representação do efeito de ionização do solo.

b) Representação das ondas de corrente e tensão

As formulações analíticas de ambas as metodologias assumem o cálculo das sobretensões ao longo das cadeias de isoladores associado a ondas de corrente com crescimento linear e constante da frente de onda. No entanto, diferentes considerações são utilizadas para determinação do tempo de frente desta corrente, conforme indicado em (7).

c) Critérios para determinação da ruptura de isolamento

A metodologia do CIGRÉ adota a denominada tensão crítica disruptiva para onda não-padronizada (CFO_{NS} , do inglês *non-standard critical flashover overvoltage*). Este valor de tensão é obtido multiplicando o CFO da linha (tensão de 50%) por um fator que considera a tensão de serviço da linha e a constante de tempo da onda de tensão desenvolvida na cadeia de isoladores. Caso o valor de pico da sobretensão na cadeia de isoladores seja igual ou superior ao CFO_{NS} , considera-se a ruptura do isolamento.

O critério recomendado pela metodologia do IEEE se baseia na denominada curva v-t que relaciona o valor de sobretensão no qual ocorre a disrupção do isolamento da linha com o instante de tempo no qual ocorre esta disrupção. Caso a sobretensão desenvolvida na cadeia de isoladores ultrapasse algum valor de tensão que conste na curva v-t associada, considera-se a ruptura do isolamento.

d) Distribuição de probabilidade acumulada do valor de pico da corrente de descarga

As metodologias do CIGRÉ e IEEE adotam diferentes distribuições para determinação da taxa de desligamentos de linhas. A distribuição utilizada pelo CIGRE se baseia na integração de uma função densidade de probabilidade (3), enquanto a metodologia do IEEE utiliza uma equação simplificada (4). A Figura 1 apresenta a comparação entre as curvas dessas distribuições.

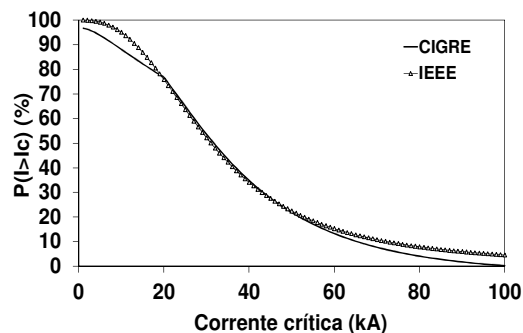


FIGURA 1 – Distribuições de probabilidade acumulada do pico de corrente de primeira descarga utilizadas pelas metodologias do CIGRÉ e IEEE.

Conforme pode-se observar, na faixa entre 20 e 60 kA as distribuições são bastante semelhantes. Além disso, a distribuição de correntes adotada pela CIGRE considera uma menor probabilidade de ocorrência de correntes elevadas em relação à distribuição do IEEE.

e) Cálculo da taxa de desligamentos por *backflashover*

Ambas as metodologias consideram no cálculo da taxa de desligamentos por *backflashover* (BFR, do inglês *Backflashover Rate*) apenas a incidência de descargas na torre. Para que seja considerado o efeito das menores sobretensões associadas às descargas que incidem ao longo do vão, aplica-se um fator de correção ao resultado. CIGRÉ e IEEE sugerem o valor 0,6 para esse fator.

Sendo assim, a BFR é determinada pela multiplicação da probabilidade da corrente crítica ser excedida pelo número de descargas que incidem na linha e pelo fator 0,6.

3. DESENVOLVIMENTOS

As análises apresentadas neste trabalho consideram a incidência direta de descarga no topo da torre de uma linha de transmissão real de nível de tensão 138 kV, com altura média de 30 m, conforme indicado na Figura 2(a). O comprimento médio dos vãos é de 400 m. A tensão de 50% (CFO) da linha é 650 kV. A Figura 2(b) apresenta os detalhes da configuração da torre de 138 kV simulada.

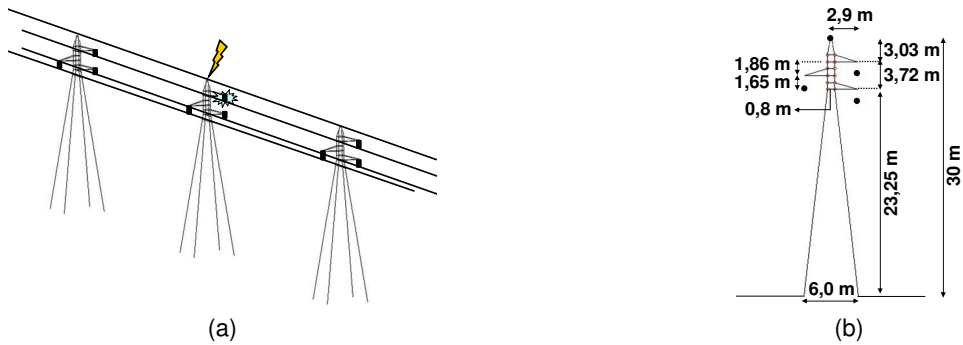


FIGURA 2 – Representação do evento simulado (a) e detalhes da configuração da torre da linha de 138 kV (b).

As simulações consideraram a corrente de descarga com frente de onda de crescimento linear, valor de pico de 31 kA e tempo de frente de 3,8 μ s, conforme ilustrado na Figura 3. Esses valores correspondem aos valores medianos de pico e tempo de frente Td30 recomendados pelo CIGRÉ (3). Os efeitos de ionização do solo e corona em torno dos condutores da linha não foram considerados.

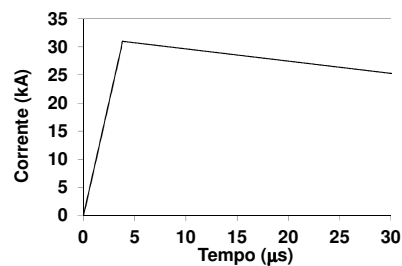


FIGURA 3 – Forma de onda de corrente considerada nas análises.

Como as metodologias do CIGRÉ e IEEE adotam diferentes formulações para determinação da taxa de incidência de descargas que atingem a linha (NL), definiu-se um valor único e fixo a ser considerado nos cálculos. Este valor corresponde à incidência de 30 descargas por 100 km de linha ao ano.

A partir da configuração da linha e da corrente injetada, foram calculados os valores de pico das sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores e os correspondentes valores de amplitude de corrente que resultariam em ruptura do isolamento da linha (corrente crítica). Com base na probabilidade de ocorrência dessas correntes, determina-se a taxa de desligamento esperada para a linha de transmissão.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Caso simplificado – Resistência de aterramento (Rat): 20 Ω

Os resultados apresentados neste item consideram um único valor de resistência de aterramento ao longo de toda a extensão da linha, sendo este igual a 20 Ω .

Os valores de pico das sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores da linha de acordo com as metodologias do CIGRÉ e do IEEE são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de pico das sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores superior, intermediária e inferior calculados utilizando a metodologia do CIGRÉ e do IEEE. (Rat = 20 Ω)

Cadeia de isoladores	Vpico (kV) CIGRE	Vpico (kV) IEEE	Varição em relação a CIGRE (%)
Superior	489,3	499,5	+2,1
Intermediária	502,9	514,7	+2,3
Inferior	516,5	526,8	+2,0

Os resultados da Tabela 1 indicam valores de sobretensão muito próximos calculados pelas metodologias do CIGRE e do IEEE. Observa-se que as sobretensões referentes à metodologia do IEEE são levemente superiores – aproximadamente 2%. Além disso, ambas as metodologias indicam a cadeia de isoladores inferior como aquela que apresenta as sobretensões mais severas.

A Tabela 2 apresenta os valores de corrente crítica e a taxa de desligamentos por *backflashover* calculadas pelas metodologias do CIGRÉ e IEEE com base no desempenho da cadeia de isoladores inferior. A análise considera a taxa de incidência de descargas por 100 km de linha ao ano (NL) igual a 30.

Tabela 2 – Corrente crítica e taxa de desligamentos por *backflashover* (BFR) - ($R_{at} = 20 \Omega$).

	CIGRE	IEEE	Diferença em relação a CIGRE (%)
Ic (kA)	41	64	+56,2
BFR	6,6	2,4	-63,6

Apesar dos valores das sobretensões calculados pelas metodologias serem muito próximos, conforme indicado na Tabela 1, verifica-se que a corrente crítica determinada pela metodologia do IEEE é aproximadamente 56% maior do que aquela calculada pela metodologia do CIGRÉ. Esta diferença tem impacto direto na determinação da taxa de desligamentos da linha. Os resultados indicam a diferença significativa entre as taxas resultantes: 6,6 (CIGRÉ) versus 2,4 (IEEE) desligamentos/100 km/ano, representando uma diferença superior a 60%. Tal variação na taxa resultante se deve aos distintos critérios para determinação da ocorrência de disrupção do isolamento da linha e as diferentes distribuições de probabilidade acumulada dos picos de corrente adotados pelas metodologias.

Conforme apresentado na seção 2, a metodologia do CIGRÉ utiliza a tensão crítica disruptiva para onda não-padronizada (CFO_{NS}) como parâmetro para determinar a ruptura do isolamento da linha. De acordo com as características da linha de 138 kV sob análise e os parâmetros de simulação utilizados, este valor é de 683 kV e corresponde à amplitude de corrente crítica de 41 kA, ou seja, correntes acima de 41 kA causariam ruptura do isolamento da linha. De acordo com a distribuição de probabilidade acumulada do CIGRÉ, aproximadamente 36% das correntes excedem essa condição.

Já a metodologia do IEEE determina a tensão crítica para disrupção com base na curva v-t da cadeia de isoladores. De acordo com as características da linha sob análise e os parâmetros da simulação, este valor de tensão equivale a 1088 kV, correspondendo a um valor de corrente crítica de 64 kA. A distribuição de probabilidade acumulada do IEEE indica que aproximadamente 13% das correntes de primeira descarga excedem essa condição.

4.2 Distribuição não-uniforme dos valores de resistência de aterramento ao longo da linha

Os resultados obtidos considerando um valor fixo de 20Ω para as resistências de aterramento das torres da linha indicaram a grande diferença nas taxas de desligamentos calculadas pelas metodologias do CIGRÉ e do IEEE. De modo a estender a avaliação para uma condição mais representativa, simulações complementares foram realizadas considerando a distribuição de resistências de aterramento ao longo da linha indicada na Tabela 3.

Tabela 3 – Distribuição percentual dos valores de resistência de aterramento das torres da linha de 138 kV.

$R_{aterramento} (\Omega)$	% de ocorrência ao longo da linha
10	4
14	6
16	8
20	20
24	30
28	16
32	8
36	4
40	3
50	1

As sobretensões resultantes na cadeia de isoladores inferior e os respectivos valores de corrente crítica foram calculados para cada valor de resistência de aterramento conforme as considerações particulares de cada metodologia. As taxas de desligamento por *backflashover* aferidas para cada valor de resistência de aterramento estão listadas na Tabela 4.

De acordo com os resultados obtidos, a metodologia do IEEE é responsável pelas menores taxas de desligamentos, independentemente do valor de resistência de aterramento. A diferença em relação às taxas aferidas pela metodologia do CIGRÉ varia entre 71% e 33%, sendo maior a diferença para os menores valores de resistência de aterramento.

Tabela 4 – Taxa de desligamentos por *backflashover* (BFR) para cada valor de resistência de aterramento da linha.

BFR			
R _{aterramento} (Ω)	CIGRE	IEEE	Diferença em relação a CIGRE(%)
10	2,3	0,7	-70,9%
14	4,0	1,2	-69,2%
16	4,9	1,6	-67,8%
20	6,6	2,4	-63,7%
24	8,0	3,3	-59,3%
28	9,3	4,2	-54,9%
32	10,3	5,1	-50,3%
36	11,2	6,0	-45,8%
40	11,9	6,9	-41,8%
50	13,2	8,9	-32,9%

A taxa total de desligamentos da linha por *backflashover* é obtida ponderando-se cada um dos valores obtidos na Tabela 4 com a distribuição de resistência de aterramento indicada na Tabela 3. O resultado final é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Taxa de desligamentos por *backflashover* (BFR) da linha.

	CIGRE	IEEE	Diferença em relação a CIGRE (%)
BFR	7,7	3,3	-57,1

Para a distribuição de resistências de aterramento considerada, a taxa de desligamentos relativa à metodologia do IEEE é aproximadamente 57% menor do que a taxa calculada pela metodologia do CIGRÉ.

4.3 Comparação com a metodologia HEM + DE

Nesta seção avalia-se o impacto das simplificações adotadas pelas metodologias do CIGRÉ e do IEEE em comparação com resultados gerados por metodologia avançada que considera a modelagem apurada dos elementos do sistema e o uso de critério que considera a dinâmica do comportamento da onda de sobretensão no processo de ruptura do isolamento da linha. Nesta metodologia, utiliza-se o modelo computacional HEM (*Hybrid Electromagnetic Model*) para cálculo das sobretensões nas cadeias de isoladores (10) e o Método da integração - DE (11) como critério para análise da ruptura do isolamento da linha.

a) Detalhes dos modelos aplicados

Uma das variáveis de maior relevância no cálculo do desempenho de linhas frente às descargas atmosféricas consiste na sobretensão desenvolvida nas cadeias de isoladores da linha. As imprecisões associadas ao cálculo desta variável podem promover erros consideráveis nas estimativas das taxas de desligamento. Neste contexto, o uso de modelos eletromagnéticos, apesar de implicar em maior tempo de processamento, possibilita gerar resultados mais precisos e de validade generalizada em relação aos obtidos por modelagens com abordagem analítica ou de representação por elementos de circuitos. Além disso, modelos eletromagnéticos permitem representar o sistema físico diretamente a partir da geometria da torre e dos condutores envolvidos e das constantes dos meios onde estes estão imersos, contemplando automaticamente os complexos acoplamentos eletromagnéticos e os efeitos de propagação no sistema. O modelo HEM é um modelo eletromagnético amplamente utilizado na literatura para o cálculo da resposta de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Os detalhes deste modelo, bem como a sua validação com base em resultados experimentais, são apresentados em (10, 12-13).

O método da integração - DE (11), consiste em critério rigoroso para verificação da condição de ruptura de isolamento em linhas. Ao contrário dos métodos adotados nas metodologias do CIGRÉ e IEEE que se baseiam apenas no valor de pico da onda de sobretensão, o método DE considera o comportamento da forma de onda de sobretensão no processo de ruptura do isolamento da cadeia de isoladores, podendo ser aplicado para sobretensões geradas por correntes representativas de descargas.

b) Comparação de resultados

Os resultados relativos ao desempenho da linha de 138 kV obtidos anteriormente pela aplicação das metodologias do CIGRÉ e do IEEE considerando o valor de 20 Ω para as resistências de aterramento são utilizados para comparação.

A Tabela 6 apresenta os valores de sobretensão calculados para as cadeias de isoladores superior, intermediária e inferior.

Tabela 6 - Valores de pico das sobretensões nas cadeias de isoladores da linha de 138 kV (Rat = 20 Ω).

Cadeia de isoladores	Vpico (kV) CIGRE	Vpico (kV) IEEE	Vpico (kV) HEM	Diferença HEM em relação a CIGRÉ(%)	Diferença HEM em relação a IEEE(%)
Superior	489,3	499,5	527,6	+7,8	+5,6
Intermediária	502,9	514,7	539,0	+7,2	+4,7
Inferior	516,5	526,8	547,6	+6,0	+3,9

Conforme pode-se observar, as sobretensões calculadas pelo modelo HEM são superiores em relação àquelas determinadas pelas abordagens analíticas do CIGRÉ e do IEEE. As diferenças variam entre 6% e 8% e entre 4% e 6%, respectivamente, sendo as maiores diferenças observadas para a cadeia de isoladores superior. Ademais, todas as metodologias apontaram a cadeia de isoladores inferior como aquela com as sobretensões mais severas.

A Tabela 7 compara os valores de corrente crítica e taxa de desligamentos por *backflashover* calculados pelas metodologias do CIGRÉ e HEM-DE. Nesta análise, a taxa de desligamentos da linha calculada por ambas as metodologias considera a distribuição de probabilidade acumulada dos picos de corrente recomendada pelo CIGRÉ.

Tabela 7 – Comparação entre os valores de corrente crítica e taxa de desligamentos por *backflashover* (BFR) calculados pelas metodologias HEM-DE e CIGRÉ (Rat = 20 Ω).

	HEM-DE	CIGRÉ	Diferença em relação a HEM-DE (%)
Ic (kA)	51,5	41	-20,4
BFR	4,2	6,6	+57,1

Os resultados obtidos indicam que a taxa de desligamentos da linha determinada pela metodologia do CIGRÉ é aproximadamente 57% maior do que a taxa calculada pela metodologia HEM-DE.

Os valores de corrente crítica e taxa de desligamentos por *backflashover* da linha calculados pelas metodologias do IEEE e HEM-DE estão indicados na Tabela 8. Neste caso, adota-se a distribuição de probabilidade acumulada dos picos de corrente recomendada pelo IEEE também no cálculo da taxa de desligamento pela metodologia HEM-DE.

Tabela 8 – Comparação entre os valores de corrente crítica e taxa de desligamentos por *backflashover* calculados pelas metodologias HEM-DE e IEEE (Rat = 20 Ω).

	HEM-DE	IEEE	Diferença em relação a HEM-DE (%)
Ic (kA)	51,5	64	+24,3
BFR	3,8	2,4	-36,8

Os resultados obtidos indicam que a taxa de desligamentos da linha determinada pela metodologia do IEEE é aproximadamente 37% menor do que a taxa calculada pela metodologia HEM-DE.

A Figura 4 resume os resultados referentes às taxas de desligamentos aferidas pelas três metodologias em análise.

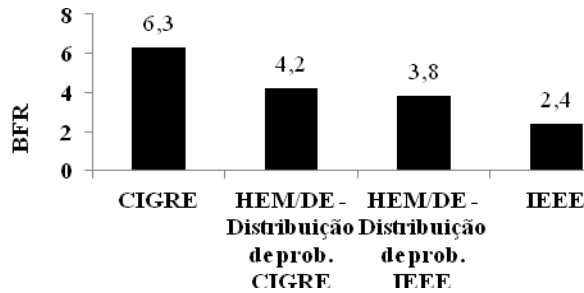


FIGURA 4 – Taxas de desligamentos aferidas pelas metodologias. (Rat = 20 Ω).

A análise conjunta das taxas de desligamentos indica que a metodologia HEM-DE gera resultados intermediários entre as taxas do CIGRÉ (maior valor) e a taxa do IEEE (menor valor). Em relação aos resultados calculados pela metodologia HEM-DE, pode-se afirmar que as simplificações e métodos adotados pelas metodologias do CIGRÉ e IEEE, superestimam e subestimam, respectivamente, as taxas de desligamentos em linhas.

Além disso, os resultados mostram o efeito das distribuições de probabilidade cumulativa de corrente na determinação da taxa de desligamentos, considerando uma mesma metodologia de cálculo.

Tomando como base a metodologia HEM-DE, observa-se que o uso da distribuição de probabilidade cumulativa do CIGRÉ resulta em taxa de 4,2 desligamentos por 100 km/ano, enquanto a distribuição de probabilidade cumulativa do IEEE leva a 3,8 desligamentos/100 km/ano, valor aproximadamente 10% menor.

Este resultado sugere que a adoção da distribuição cumulativa do IEEE em análises de desempenho de linhas pode resultar na obtenção de menores taxas de desligamentos.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma avaliação relativa à qualidade dos resultados das metodologias tradicionais de cálculo de desempenho de linhas frente às descargas atmosféricas. Especificamente, abordou-se as metodologias do CIGRÉ e do IEEE por serem as mais utilizadas pelo setor elétrico.

Análises relativas à taxa de desligamentos por *backflashover* de uma linha real de classe de tensão 138 kV foram realizadas. Os resultados obtidos foram comparados com os referentes à aplicação de metodologia mais avançada baseada no cálculo das sobretensões nos isoladores por modelo eletromagnético e uso de critério mais consistente para análise da ruptura do isolamento desses isoladores.

Verificou-se a grande diferença entre as taxas de desligamento calculadas pelas metodologias em estudo, sendo as maiores e menores taxas associadas às metodologias do CIGRÉ e do IEEE, respectivamente. Quanto menor o valor da resistência de aterramento da linha, maior é a diferença entre as taxas de desligamentos aferidas por essas metodologias. Variações entre 71% e 33% foram identificadas.

A comparação com os resultados obtidos pela aplicação da metodologia HEM-DE indicou taxas de desligamentos intermediárias entre aquelas do CIGRÉ e IEEE – aproximadamente 36% menor e 58% maior, respectivamente.

Este conjunto de resultados aponta a necessidade de evolução das metodologias tradicionais de cálculo de desempenho, a fim de evitar que as simplificações adotadas por tais metodologias resultem em avaliação errôneas que influenciam na tomada de decisão referente à proteção das linhas frente às descargas atmosféricas.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) pelo apoio financeiro concedido para a realização da pesquisa apresentada neste artigo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) VISACRO, S., "Direct Strokes to Transmission Lines: Considerations on the Mechanisms of Overvoltage Formation and their Influence on the Lightning Performance of Lines," J. Lightning, vol.1, pp. 60-68, 2007.
- (2) VISACRO, S., "Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia", Ed. ArtLiber, São Paulo, 2005.
- (3) CIGRE Guide to Procedures for estimating the lightning Performance of Transmission Lines, WG 01 (Lightning), Study Committee 33, 1991.

- (4) ANDERSON, J. G., "Lightning Performance of Transmission Lines". In: Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above. 2. ed. California: Electric Power Research Institute – EPRI, 1982. p. 545-597.
- (5) IEEE. Working Group on Lightning Performance of Transmission Lines. "A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines", IEEE Trans. Power App. Syst, v. PAS-104, n. 4, abr. 1985.
- (6) IEEE. "Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines. IEEE Std 1243". 1997.
- (7) SOUZA, R.E., Avaliação de metodologias para análise de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas, Dissertação de mestrado, PPGEE-UFMG, Julho, 2013.
- (8) SILVEIRA, F.H., VISACRO, S., De Conti, A. "Lightning Performance of 138-kV Transmission Lines: The Relevance of Subsequent Strokes", IEEE Trans. Electromagn. Compat., v. 55, p. 1195-1200, dez. 2013.
- (9) SILVEIRA, F. H.; VISACRO, S.; DE CONTI, A.; MESQUITA, C. R. Backflashovers of Transmission Lines Due to Subsequent Lightning Strokes. IEEE Trans. Electromagn. Compat, v. 54, n. 2, p. 316-322, abr. 2012.
- (10) VISACRO, S., SOARES, A., "HEM: A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems". IEEE Trans. Power Del., v. 20, n. 2, p. 1026-1028, abr. 2005.
- (11) HILEMAN, H., "Insulation coordination for power systems". Boca Raton, FL: CRC, 1999, pp. 627–640.
- (12) VISACRO, S., SILVEIRA, F.H., "Evaluation of current distribution along the lightning discharge channel by a hybrid electromagnetic model," J.Electrostatics, vol.60/2-4, pp.111-120, 2004.
- (13) SOARES J., A., SCHROEDER, M.A.O., VISACRO, S. "Transient voltages in transmission lines caused by direct lightning strikes", IEEE Trans. Power Del., vol. 20, pp. 1447-1452, Apr. 2005.

8. DADOS BIOGRÁFICOS



Fernando H. Silveira possui graduação (1999), mestrado (2001) e doutorado (2006) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Atualmente é professor adjunto II, dedicação exclusiva, do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG e pesquisador associado ao LRC (Lightning Research Center) da UFMG. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas, eletromagnetismo aplicado, descargas atmosféricas (modelagem física do fenômeno), tensões induzidas por descargas atmosféricas, efeitos causados em redes de energia elétrica e unidades consumidoras pela incidência de descargas atmosféricas em estruturas elevadas e proteção de sistemas elétricos contra os efeitos associados às descargas. É autor ou coautor de mais de 20 artigos em periódicos e 75 artigos em conferências. É membro do IEEE, sendo revisor regular do IEEE Transactions on Power Delivery e IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. É representante brasileiro do WG C4.37 da CIGRE (*Electromagnetic Computation Methods for Lightning Surge Studies with Emphasis on the FDTD Method*) e membro do GT4 BR01 (Desempenho de Linhas de Transmissão frente a Descargas Atmosféricas) do CIGRE-Brasil.



Silvério Visacro nasceu em Belo Horizonte em 1956. Graduou-se (1979) e obteve o mestrado (1983) em Eng. Elétrica pela UFMG e doutorou-se na COPPE/UFRJ (1992). É Professor Titular da UFMG na área de Eng. Elétrica em Eletromagnetismo Aplicado, com ênfase nas aplicações associadas às Descargas Atmosféricas e aos Aterramentos Elétricos. Em 2001, com o suporte da CEMIG constituiu o LRC - Lightning Research Center, avançado centro de pesquisa dos raios e seus efeitos, onde lidera equipe de 50 membros, dentre docentes, pós-doutorandos e alunos (doutorandos, mestrandos e de Iniciação Científica) na realização de pesquisas de alto nível. É autor de dois livros, respectivamente nos temas Aterramentos Elétricos e Descargas Atmosféricas, e de mais de 300 artigos (52 em periódicos), além de 3 capítulos de livros internacionais. É um dos editores do Journal of Lightning Research e preside o GROUND &

LPE: Intern. Conference on Grounding and Earthing & Lightning Physics and Effects. Atua no Comitê Científico de outros eventos internacionais da área: SICEL e SIPDA e Coordena a Rede Brasileira de Sobretensões Atmosféricas. Foi ou é representante brasileiro em vários grupos de trabalho do CIGRE, sendo inclusive o coordenador dos WG C4.406 e C4.33.



Ronaldo E. de Souza Filho nasceu em Cachoeiro de Itapemirim em 1987. Possui graduação (2011) e mestrado (2013) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Atualmente é aluno de doutorado da UFMG. Participa do grupo de pesquisa LRC (Lightning Research Center) – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Transmissão e Distribuição da Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: Aterramentos Elétricos, Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas e Redes de Distribuição Compactas. É associado ao CIGRE-Brasil.