



**XXIV SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GDS/04

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO -X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

**DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS:
CONTRIBUIÇÕES BRASILEIRAS AO GRUPO INTERNACIONAL CIGRE WG C4.23**

**Silvério Visacro Fernando H. Silveira
LRC – Lightning Research Center
UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais**

RESUMO

Este trabalho reporta as contribuições brasileiras ao CIGRE WG C4.23, de revisão da brochura TB 63 (Desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas), que têm foco no impacto dos avanços científicos nas últimas décadas no conhecimento do tema. Dentre as contribuições, destacam-se representação da forma de onda de corrente, novas curvas de distribuição de parâmetros, notadamente do valor de pico de corrente de descarga, a reposta impulsiva e representação do aterramento de torres, além da modelagem de outros componentes da linha. A aplicação de elaborado modelo computacional no cálculo das sobretensões atmosféricas constitui ponto diferencial da contribuição.

PALAVRAS-CHAVE

Desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, Correntes de Descargas Atmosféricas, Aterramentos elétricos, *Backflashover*, Metodologias de cálculo, Sobretensões Atmosféricas, CIGRE WG C4.23.

1.0 - INTRODUÇÃO

Apesar da significativa evolução do conhecimento sobre a descarga atmosférica nas últimas décadas, o fenômeno permanece como uma das principais fontes de desligamentos de linhas de transmissão, podendo afetar significativamente a qualidade de energia fornecida aos consumidores.

Nos últimos anos as restrições impostas pelas agências reguladoras e concessionárias de energia elétrica de todo o mundo têm tornado os limites aceitáveis de desempenho das linhas mais estritos, levando à necessidade de revisão das abordagens utilizadas para cálculo e melhoria de desempenho (1,2). As abordagens tradicionais de maior uso pelas empresas do setor elétrico, basicamente as desenvolvidas pelo CIGRE e pelo IEEE nas décadas de 1980 e 1990 (3-5), incluindo o programa *FLASH*, adotam simplificações nos cálculos que, apesar de produzir facilidades de aplicação, tornam a qualidade de seus resultados questionável.

Ao longo das duas últimas décadas, o conhecimento sobre as descargas evoluiu significativamente, particularmente na caracterização dos seus parâmetros locais de frequência (a partir da disseminação dos sistemas de localização de raios) e dos parâmetros da sua corrente, fonte principal de seus efeitos (6-9). Também, houve avanço na modelagem dos principais componentes das linhas de transmissão com a aplicação de representações fisicamente mais consistentes, notadamente dos aterramentos elétricos (10-13). Além disso, a aplicação de modernas ferramentas computacionais e técnicas numéricas no cálculo das sobretensões desenvolvidas pela incidência de descargas nos isoladores da linha possibilitou significativa evolução na qualidade das estimativas da sobretensão. Tal sobretensão consiste no elemento fundamental para determinação das expectativas de desempenho da linha (14,15).

Este contexto motivou em 2012 a constituição do grupo internacional do CIGRE WG C4.23 dedicado à revisão da brochura 63 (*Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines*), publicada em 1991 (3), com o objetivo de atualizar e incluir o conhecimento relativo às descargas atmosféricas e ao desempenho de linhas e descrever as técnicas e abordagens mais recentes aplicadas ao cálculo de tal desempenho. Seguindo essa tendência, foi estabelecido no Brasil também em 2012 o grupo brasileiro do CIGRE GT4-BR01 (Desempenho de Linhas de Transmissão frente a Descargas Atmosféricas), grupo espelho do grupo internacional, que tem três objetivos principais: (i) a apresentação de contribuições brasileiras ao grupo internacional; (ii) assegurar que a nova brochura incorpore abordagens que contemplem soluções para as condições típicas do ambiente brasileiro, notadamente a alta taxa de incidência de descargas, o elevado valor de resistividade do solo e a configuração de sistemas de transmissão muito extensos; (iii) atualizar os representantes brasileiros na nova cultura técnica relativa à brochura para sua posterior disseminação no meio técnico brasileiro.

O presente trabalho tem como objetivo reportar, de forma concisa, as principais contribuições brasileiras ao grupo internacional, as quais se estendem numa ampla área que compreende desde a representação da forma de onda da corrente de descarga e de seus parâmetros para o cálculo de desempenho, à resposta impulsiva e representação dos aterramentos elétricos e outros componentes da linha, até a aplicação de elaborado modelo computacional para o cálculo das sobretensões nos isoladores, resultantes da incidência na linha.

2.0 - O CONTEXTO DO GRUPO INTERNACIONAL WG C4.23

Ao longo dos anos, diversas abordagens e técnicas para o cálculo de desempenho de linhas frente às descargas atmosféricas têm sido apresentadas na literatura, com o foco na formalização de procedimentos que auxiliem os projetistas de linhas na avaliação de seu desempenho frente ao fenômeno. Até pouco tempo, os principais marcos desse desenvolvimento remontavam às décadas de 1980 e 1990, com alguns destaques. Em 1982 o EPRI publicou um método simplificado de cálculo de desempenho para calculadoras manuais ou programáveis (4); De 1985 a 1997 o método simplificado do EPRI foi adotado e aperfeiçoado pelo IEEE, levando à posterior publicação da IEEE Standard 1243 (5); Em 1991, foi publicada a brochura 63 do CIGRE "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines" (3). Desde, então não foram publicados textos gerais de impacto na área.

Com a significativa evolução do conhecimento sobre as descargas e das questões afeitas ao desempenho de linhas de transmissão nas últimas décadas, tornou-se necessária a atualização das informações apresentadas na primeira versão da brochura (1991) e a descrição das técnicas e ferramentas atuais dedicadas à análise de desempenho de linhas de transmissão.

Constituído por membros de aproximadamente 14 países, o grupo internacional tem se reunido regularmente para a proposição de melhorias ao documento de 1991, incluindo a discussão relativa aos principais parâmetros de interesse para a análise de desempenho de LTs e a realização de estudos de caso que possam servir como referências para o desenvolvimento de análises de sensibilidade com as principais técnicas de cálculo de desempenho apresentadas na literatura. O grupo conta com a participação efetiva de dois representantes brasileiros.

3.0 - PONTOS RELEVANTES SOB ANÁLISE PELO GRUPO CIGRE WG C4.23 E AS CONTRIBUIÇÕES BRASILEIRAS

O grupo internacional desenvolve atividades que abrangem a avaliação de todos os pontos da brochura 63 do CIGRE. Os representantes brasileiros buscaram identificar e focar os esforços para suas contribuições nos elementos de maior relevância para o desempenho da linha frente a descargas, tendo em conta o impacto do avanço científico recente no campo em que se posicionam tais elementos. Nos itens seguintes, tais elementos são brevemente discutidos e as correspondentes contribuições brasileiras são realçadas.

3.1) Parâmetros de descarga

A frequência de desligamentos de uma linha de transmissão é determinada pelas condições locais de incidência de descarga e de seus parâmetros, principalmente, o valor de pico de corrente de primeira descarga e o seu tempo de frente. Notadamente, a densidade de incidência de descargas e a distribuição probabilística dos picos de corrente são elementos fundamentais para cálculo da taxa de desligamentos da linha.

A brochura 63 adotava uma distribuição única de pico de corrente, na expectativa de que esta refletisse as condições de diversas regiões do mundo. Particularmente, recomenda o uso da distribuição de correntes de retorno de primeira descarga baseada nos dados de medições realizados por K. Berger em Mount San Salvatore, Suíça (3), e compilados nos trabalhos (16,17).

Este é um ponto em discussão no grupo. Face à evolução do conhecimento científico relativo aos dados de descargas atmosféricas em diferentes partes do mundo, a nova brochura deverá fazer referência aos dados contidos na brochura do CIGRE TB 549 – *Lightning Parameters for Engineering Applications* (18), publicada em 2013, bem como recomendar a utilização de dados locais, quando disponíveis.

Nesse contexto, a contribuição brasileira consistiu na constituição de uma distribuição específica de picos de corrente de medição de corrente de descarga obtidos na torre instrumentada da estação de medição do Morro do Cachimbo, em Belo Horizonte, Brasil (6,7). A base de dados correspondente conta com 50 registros de primeira descarga e 71 registros de descargas subsequentes e constitui a única base de dados de correntes de descargas medida em regiões tropicais. Igualmente, foi constituída uma distribuição probabilísticas de tempos de frente para as duas correntes. Neste sentido, tem sido aceita pelo grupo a indicação do uso das curvas de distribuição brasileiras, já incluídas na brochura CIGRE TB 549 para avaliações em regiões tropicais.

É importante destacar que os valores medianos de pico de corrente e tempo de frente Td30 de primeira descarga medidos na estação do Morro do Cachimbo são de 45 kA e 4,3 μ s, respectivamente (7), sendo aproximadamente 45% e 13% superiores àqueles referentes às medições de corrente de Monte San Salvatore, conforme mostra a Tabela 1. A Figura 1 apresenta a comparação entre as distribuições de picos de corrente de primeira descarga medidas na estação do Morro do Cachimbo e aquelas sugeridas pelo CIGRE e pelo IEEE.

Tabela 1 – Valores medianos de pico de corrente e tempo de frente Td30 de primeiras descargas medidos nas estações de Monte San Salvatore (Suíça) e Morro do Cachimbo (Brasil).

Estação	I_p (kA)	Td30 (μ s)
Monte San Salvatore (17)	31	3,8
Morro do Cachimbo (7)	45	4,3

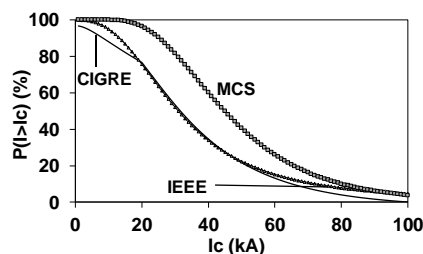


Figura 1 – Distribuições de picos de corrente de primeira descarga: CIGRE e Morro do Cachimbo (MCS).

Conforme discutido em (19), os dados medianos de primeira descarga da estação do Morro do Cachimbo, a despeito de seu maior tempo de frente, são mais severos para o desempenho de LTs em relação aos dados medianos de Monte San Salvatore, tipicamente aplicados na literatura. Este comportamento reforça a necessidade do uso de dados locais para a avaliação de desempenho de LTs frente às descargas atmosféricas.

3.2) Forma de onda da corrente de descarga

A definição da forma de onda de corrente de descarga que incide na linha tem impacto direto na sobretensão resultante em suas cadeias de isoladores e, conseqüentemente, em seu desempenho.

Conforme destacado em (20), as ondas individuais de corrente de primeira descarga apresentam como principais características um formato côncavo em seus primeiros microssegundos, seguido de um crescimento abrupto até o primeiro pico e a presença de múltiplos picos, conforme ilustrado na Figura 2.

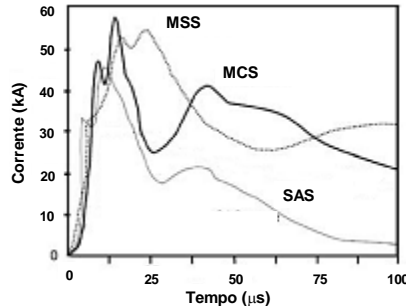


Figura 2 – Perfil típico de ondas de corrente de primeira descarga medidas em torres instrumentadas. MSS: Monte San Salvatore, MCS: Morro do Cachimbo e SAS: África do Sul. Adaptado de (20).

Apesar do conhecimento de tais características, tradicionalmente os estudos de desempenho de linhas de transmissão consideram representações muito simplificadas das ondas de corrente, implicando em ondas de sobretensão nos isoladores da linha muito distintas (em forma e amplitude) daquelas desenvolvidas em resposta a correntes reais de descarga. Alguns estudos empregam ondas triangulares ou duplas exponenciais e, mais recentemente, ondas obtidas a partir de funções de Heidler. Particularmente, a primeira versão da brochura (3) apesar de sugerir o uso de onda de corrente com crescimento côncavo, apresenta sua metodologia para cálculo de desempenho relacionada apenas às ondas de corrente com crescimento linear da frente de onda.

Nesse contexto, a contribuição brasileira se refere à recomendação de uso da forma de onda de corrente denominada duplo pico (21), e que representa as principais características observadas em ondas individuais de corrente medidas, notadamente a concavidade da frente de onda e a presença de múltiplos picos. Esta forma de onda é capaz de reproduzir os valores medianos de pico de corrente e tempos (T10, T30 e T50) associados aos eventos medidos nas estações de Monte San Salvatore e do Morro do Cachimbo.

A Figura 3 ilustra formas de onda de corrente de descarga e as referidas ondas de sobretensão resultantes na cadeia de isoladores de uma linha de transmissão de 138 kV, circuito simples (22). As ondas de corrente consideradas são: (i) Triangular, (ii) Heidler, (iii) Cigre e (iv) Duplo pico, todas elas com $I_p = 31$ kA e $T_{d30} = 3.8$ μ s. As formas de onda de corrente (iii) e (iv) contemplam a concavidade acentuada da frente de onda. Complementando as análises, a Tabela 2 indica os valores de pico de sobretensão associado a tais ondas em função do valor da resistência de aterramento da torre. Os resultados mostram a notória diferença entre as formas de onda e as amplitudes de ondas de sobretensão resultantes nos isoladores da linha.

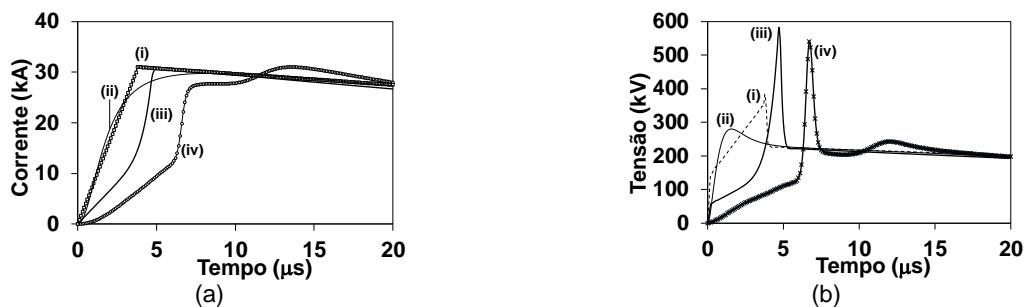


Figura 3 - Formas de onda de corrente (a). (i)Triangular, (ii)Heidler, (iii) Cigre e (iv) Duplo pico; Sobretensões resultantes na cadeia de isoladores superior de uma linha de 138 kV, $R_{at} = 10$ Ω . Adaptado de (22).

Tabela 2 – Valores de pico das sobretensões na cadeia de isoladores superior em função da resistência de aterramento de pé de torre. Adaptado de (22).

Rat (Ω)	Vp (kV) – Triangular	Vp (kV) – Heidler	Vp (kV) – Cigre	Vp (kV) – Duplo pico
10	383,8	294,8	582,7	540,2
20	584,8	425,2	750,8	662,4
30	772,8	616,1	907,5	790,5

Dependendo do método adotado para se estimar a ocorrência de backflashover na cadeia de isoladores, a escolha da forma de onda de corrente de descarga a ser simulada afeta significativamente o cálculo da taxa de desligamentos da LT. Segundo as avaliações apresentadas na referência (23), métodos de ruptura de isolamento que consideram apenas o pico de corrente na análise de ocorrência de flashover são mais sensíveis às definições referentes à onda de corrente de descarga.

3.3 Abordagens para cálculo da sobretensão resultante nas cadeias de isoladores

O balanço entre a sobretensão resultante nas cadeias de isoladores e a capacidade de tais isoladores em suportar tal sobretensão sem que ocorra a ruptura do isolamento define o desempenho da LT frente às descargas. Nesse contexto, o cálculo apurado da sobretensão é primordial para a correta estimativa de desempenho da linha.

Diversas abordagens para o cálculo desta sobretensão são apresentadas na literatura. A abordagem analítica trata o cálculo da sobretensão com base em representações simplificadas dos componentes do sistema (linha, torre e aterramentos) (3-5). Apesar das simplificações adotadas que são capazes de afetar significativamente o resultado, esse tipo de abordagem permite a obtenção de resultados de forma simples e direta, não sendo necessário nenhum processamento avançado.

A evolução dos recursos computacionais de forma geral permitiu o desenvolvimento de representações mais apuradas dos componentes da LT, bem como o uso de abordagens de cálculo mais elaboradas. A abordagem por parâmetros de circuitos distribuídos, com base na aplicação de modelos baseados na plataforma EMTP/ATP tem sido largamente aplicada nos últimos anos (24). Também, tem sido uma tendência o desenvolvimento e a aplicação de modelos computacionais baseado em teoria eletromagnética para o cálculo das sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores de LTs. Apesar de implicar maior tempo de processamento, a aplicação desses modelos 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 (14,25,26).

A contribuição brasileira para o grupo do CIGRE consiste na apresentação e aplicação do modelo HEM (*Hybrid Electromagnetic Model*) para o cálculo das sobretensões nas cadeias de isoladores. 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 (12-15,22,23,26). Trata-se atualmente do único modelo eletromagnético ajustado e sistematicamente aplicado para a análise de desempenho de linhas frente a descargas.

O uso do modelo HEM no contexto do grupo WG C4.23 tem possibilitado duas importantes contribuições nas análises de desempenho de linhas. A primeira consiste no seu uso direto no cálculo de sobretensões, como elemento do processo de determinação da taxa de desligamento da linha. Mas, talvez, a contribuição mais importante seja na realização de análises sistemáticas de sensibilidade, com a constituição de referências para se avaliar a qualidade de modelos simplificados propostos para representação dos componentes da linha e das descargas. Tais avaliações são realizadas comparando-se a sobretensão resultante nos isoladores da linha calculada com alta exatidão a partir do emprego do HEM e da representação física do problema com aquela decorrente do uso do modelo simplificado, como os adotados em abordagens analíticas e por parâmetros de circuitos.

3.4) Representação dos efeitos associados ao comportamento impulsivo do solo no desempenho das linhas

O comportamento transitório dos aterramentos elétricos frente às correntes de descargas tem impacto direto na determinação do desempenho de LTs. Nesse contexto, o tipo de representação utilizado, bem como as considerações relativas aos parâmetros elétricos do solo, notadamente a resistividade e a permissividade do solo são aspectos fundamentais para o cálculo da taxa de desligamentos.

Neste aspecto, há duas importantes contribuições brasileiras. A primeira consistiu na demonstração da necessidade de se ter em conta o efeito da dependência da frequência da resistividade e da permissividade do solo na determinação da resposta do aterramento e na forma de se determinar a impedância de aterramento das torres considerando tal efeito. Apesar de referências antigas fazerem menção ao tema (3), por seus resultados se basearem em experimentos laboratoriais e não haver conhecimento suficiente no tema para cômputo e modelagem do efeito, este era ignorado, inclusive na brochura 63 do CIGRE. A segunda refere-se à forma de se representar o aterramento da torre de maneira mais concisa na avaliação de desempenho de LTs.

Mais especificamente, a contribuição brasileira consistiu na apresentação de desenvolvimentos experimentais que comprovam a existência de tal efeito (10) e o desenvolvimento de expressões de engenharia para se ter em conta

a variação dos parâmetros resistividade e permissividade com a frequência em simulações computacionais para cálculo da elevação de potencial do solo e as sobretensões resultantes na cadeia de isoladores de LTs (11,12).

A Tabela 3 apresenta o efeito da dependência com a frequência dos parâmetros do solo na taxa de desligamentos por backflashover de uma LT de nível de tensão 138 kV para resistividades do solo 300, 1000 e 2000 Ωm . Os resultados mostram que tal efeito afeta significativamente a taxa de desligamentos de LTs, principalmente para aquelas linhas instaladas em solos de resistividade moderada e elevada. Com o aumento da resistividade do solo, este efeito se torna mais relevante.

Tabela 3 - Efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo no desempenho da LT de 138 kV. Adaptado de (12).

ρ ($\Omega\text{.m}$)	Desligamentos / 100 km/ano		Redução (%)
	ρ constante	$\rho(\omega), \epsilon(\omega)$	
300	2,05	1,73	15,1
1000	2,51	1,91	23,8
2000	4,87	3,22	32,6

A Figura 4 mostra nitidamente o impacto do cômputo do efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo no desempenho de duas linhas de transmissão de níveis de 138 e 220 kV, para diferentes valores de resistividade do solo. Nota-se que o efeito é favorável e muito importante na faixa de resistividade comum em solos brasileiros (de 1000 a 2500 Ωm), correspondendo a um aumento da corrente crítica capaz de levar o isolador à ruptura e a uma conseqüente diminuição da taxa de desligamentos.

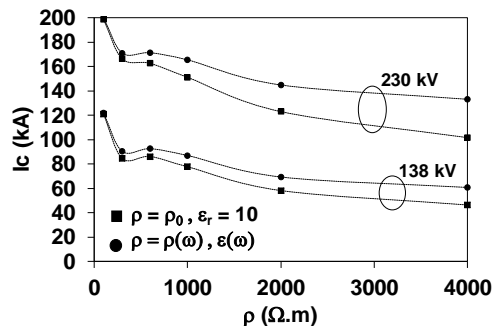


Figura 4 – O efeito da da dependência da frequência dos parâmetros do solo no desempenho de duas linhas de transmissão de níveis de 138 e 220 kV. Adaptado de (12).

3.5) Estudo de representações simplificadas do aterramento elétrico para o cálculo de desempenho

As abordagens analíticas e por parâmetros de circuitos distribuídos não são capazes de representar o aterramento elétrico diretamente a partir de sua configuração física, geometria e disposição dos eletrodos enterrados no solo. Tradicionalmente, tais abordagens representam o aterramento de forma simplificada, notadamente como um parâmetro concentrado com valor da resistência de aterramento medida em baixa frequência (R_{at}). Conforme investigado em (13), esse tipo de representação pode resultar em erros muito significativos na estimativa da taxa de desempenho de LTs.

Uma importante contribuição brasileira consiste na determinação de forma concisa de representação dos aterramentos elétricos, principalmente para programas que adotam a abordagem por parâmetros de circuitos. De acordo com desenvolvimentos apresentados em (13), o uso do valor de impedância impulsiva Z_p calculado para parâmetros medianos da corrente da primeira descarga resulta em desempenho da LT praticamente idêntico àquele obtido pela representação física de cabos contrapeso enterrados no solo, conforme ilustrado na Figura 5. Tal figura compara a probabilidade de ocorrência de backflashover utilizando a representação física do aterramento e representações concisas considerando os valores de Z_p e R_{at} para um solo de 1000 Ωm . Os resultados obtidos indicam, também, que a representação pelo valor de resistência de aterramento resulta em taxa de desligamentos da linha muito superior, principalmente para aquelas condições nas quais o comprimento dos eletrodos de aterramento é igual ou inferior ao seu comprimento efetivo (13), como acontece nos problemas práticos.

Esta contribuição tem significativo impacto para a análise de desempenho de LT, resultando na recomendação de se utilizar um número real correspondente à impedância impulsiva, principalmente para programas baseados em circuitos a parâmetros distribuídos do tipo EMTP/ATP.

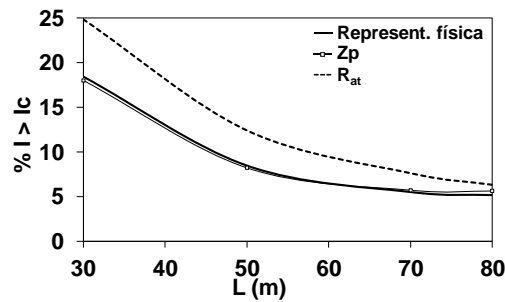


Figura 5 – Probabilidade de ocorrência de backflashover associada à representação física do aterramento e as representações concisas dadas pela impedância impulsiva Z_p e a resistência de aterramento R_{at} para um solo de $1000 \Omega m$ (efeito da dependência com a frequência incluído). Adaptado de (13).

3.6) Contribuições complementares em análise pelo grupo WG C4.23

Algumas contribuições brasileiras complementares estão ainda em discussão no grupo internacional. Destas, destacam-se:

- A possibilidade de consideração das descargas subsequentes nas análises de desempenho de LTs frente às descargas. Tradicionalmente, apenas as primeiras descargas são consideradas nos estudos de desempenho. De acordo com os desenvolvimentos apresentados em (26,27), a descarga subsequente pode ter contribuição significativa para a taxa de desligamentos de LTs de 69 kV e 138 kV. Isto ocorre principalmente no caso de torres de altura superior a 30 m, em condições nas quais a linha já apresenta um bom desempenho frente às primeiras descargas (para resistências de aterramento na faixa de 20Ω e inferior);

- Nas práticas de melhoria de desempenho de linhas, quando existe grande dificuldade de melhoria do aterramento de torres específicas ou grupo de torres, seja por valores elevadíssimos de resistividade do solo ou limitações de relevo na implantação de aterramentos, usualmente se recomenda o oneroso uso de dispositivos para-raios. Na referência (28) dos autores se apresenta uma efetiva alternativa menos onerosa, anterior à opção pela instalação de dispositivos para-raios: uso de cabos inferiores aterrados, conectados à estrutura da torre conforme descrito em (28) (designados *underbuilt wires*). Os resultados da aplicação desta técnica não convencional para a melhoria de desempenho da linha equivalem, em certos casos, à redução da resistência de aterramento à metade. Consiste em uma excelente alternativa para melhoria de desempenho de trechos da linha instalados em solos de elevada resistividade, principalmente naqueles trechos de linha nos quais as técnicas convencionais de redução da resistência de aterramento têm difícil implementação.

- Finalmente, vale mencionar a proposta de adoção de uma abordagem reversa a ser aplicada no projeto de aterramentos elétricos das torres da linha, de modo a garantir desempenho específico da LT em termos da taxa de desligamentos por *backflashover* (15).

4.0 - COMENTÁRIOS FINAIS

Este trabalho teve como objetivo apresentar as principais contribuições brasileiras para o grupo internacional WG C4.23, *Guide to procedures to estimate the lightning performance of transmission lines*, constituído para a revisão da brochura técnica 63 do CIGRE que trata do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas.

Dentre as contribuições brasileiras, destacam-se a representação da forma de onda de corrente de descarga e de seus parâmetros para o cálculo de desempenho, os efeitos associados ao comportamento impulsivo do solo no desempenho das linhas, notadamente a dependência com a frequência dos parâmetros resistividade e permissividade, a aplicação de elaborado modelo computacional para o cálculo das sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores de LTs e a representação concisa do aterramento elétrico para fins de simulação computacional em modelos que utilizam a abordagem por parâmetros de circuito distribuído do tipo EMTP/ATP.

Vale ressaltar que as condições peculiares do ambiente brasileiro, com elevada taxa de incidência de descargas e solos de elevada resistividade resultam em condição especial para a análise de desempenho de linhas. Tais condições têm impacto relevante na taxa de desligamentos de LTs, denotando a importância de se considerar os aspectos discutidos nesse trabalho e o uso de modelagens avançadas nas avaliações de desempenho sob tais condições.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SILVEIRA, F.H., VISACRO, S., SOUZA, R.E., "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, 2017.
- (2) SILVEIRA, F. H.; VISACRO, S., SOUZA, R. E., "Avaliação de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas: Análise da qualidade dos resultados das metodologias de cálculo". In: XXIII SNPTTEE - SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015, Foz do Iguaçu.
- (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. pp. 545-597.
- (5) IEEE. "Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines. IEEE Std 1243". 1997.
- (6) VISACRO, S., SCHROEDER, M. A., SOARES J., A., CHERCHIGLIA, L. C. L. , SOUZA, V. J., "Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station". J.Geophy Res., v. 109, 2004.
- (7) VISACRO, S., MESQUITA, C.R., DE CONTI, A., SILVEIRA, F.H., "Updated statistics of lightning currents measured at Morro do Cachimbo Station", Atmospheric Research, v.117, p.55 - 63, 2012.
- (8) TAKAMI, J., and OKABE, S, "Observational Results of Lightning Current on Transmission Towers", IEEE Trans. Power Delivery, vol.22, no. 1, pp.547 – 556, Jan 2007.
- (9) RAKOV, V., and UMAN, M.A., "Lightning – Physics and Effects", Cambridge University Press, 2003.
- (10) VISACRO, S., ALIPIO, R., VALE, M. H. M., PEREIRA, C., "The response of grounding electrodes to lightning currents: The effect of frequency dependent soil resistivity and permittivity," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 53, no. 2, pp. 401–406, Maio, 2011.
- (11) VISACRO, S., ALIPIO, R., "Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes," IEEE Trans. Power Del., vol. 27, no. 2, pp. 927–935, Apr. 2012.
- (12) VISACRO, S., SILVEIRA, F.H., "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.
- (13) VISACRO, S., SILVEIRA, F.H., "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.
- (14) VISACRO, S., SOARES J, A., "HEM: A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems". IEEE Trans. Power Del., v. 20, n. 2, pp. 1026-1028, April 2005.
- (15) VISACRO, S., SILVEIRA, F. H., "Lightning performance of transmission lines: Methodology to design grounding electrodes to ensure an expected outage rate," IEEE Trans. Power Del., vol. 30, no. 1, pp. 237–245, Feb. 2015.
- (16) BERGER, K., ANDERSON, R. B., KRONINGER, H., "Parameters of lightning flashes," Electra, no. 80, pp. 223–237, 1975.
- (17) ANDERSON, R. B., ERIKSSON, A.J., "Lightning parameters for engineering application," Electra, vol.69, pp. 65-102, 1980.
- (18) Cigre Brochure 549 - Lightning Parameters for Engineering Applications - Working Group C4.407, Agosto 2013.
- (19) SILVEIRA, F. H.; VISACRO, S. . The Impact of Peak Current Distribution on the Calculation of Backflashover Rate of Transmission Lines. In: VIII SICEL 2015, Valparaíso, Chile.
- (20) VISACRO, S., "A representative curve for lightning current waveshape of first negative stroke," Geophys. Res. Lett., vol. 31, no. L07112, Apr. 2004.
- (21) DE CONTI, A., VISACRO, S., "Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 49, no. 2, pp. 448–451, May 2007.
- (22) SILVEIRA, F. H., VISACRO, S., DE CONTI, A., TEIXEIRA, F.M., "The Influence of Lightning Stroke Current Waveform on the Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines". In: APL 2015, Nagoya, p. 799-803.
- (23) SILVEIRA, F. H., VISACRO, S., "Typical line insulation flashover modeling and their effect on the calculation of backflashover outage rate of transmission lines", In: Proc. GROUND'2016 & 7th LPE, 2016. p. 204-207.
- (24) ENGELBRECH, C.S., TANNEMAAT, I., HESEN, P.L.J., Insulation coordination and statistical evaluation of the lightning performance with ATP/EMTP, In: APL 2015, Nagoya., pp.793 – 798.
- (25) TRAN, H. T.; BABA, Y., ITAMOTO, N.; RAKOV, V., FDTD Simulation of Back-Flashover at the Transmission-Line Tower Struck by Lightning Considering Ground-Wire Corona, Proc. 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP 2016), Estoril, 2016.
- (26) 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, pp. 1195-1200, Dec. 2013.
- (27) SILVEIRA, F.H., VISACRO,S., DE CONTI, A., MESQUITA, C.R., "Backflashovers of Transmission Lines Due to Subsequent Lightning Stroke.", IEEE Trans. Electromagn. Compat, v. 54, n. 2, pp. 316-322, Apr. 2012.
- (28) SILVEIRA, F.H., VISACRO,S., DE CONTI, A., "The use of underbuilt wires to improve the lightning performance of transmission lines," IEEE Trans. Power Del., vol. 27, no. 1, pp. 205–213, Jan. 2012

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Silvério Visacro - IEEE Fellow, "IEEE Kanda Award 2016" e "ICLP Karl Berger Award 2016".

Nasceu em Belo Horizonte em 1956. Graduiu-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. Atua na área de Eletromagnetismo Aplicado, com ênfase nas aplicações em Aterramentos Elétricos, Descargas Atmosféricas e Linhas de Transmissão. Em 2001, com o suporte da CEMIG, fundou o LRC - Lightning Research Center, avançado centro de pesquisa dos raios e seus efeitos, onde lidera equipe de aproximadamente 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**, de **3 capítulos de livros internacionais**, além de mais de **400 artigos de periódicos e congressos**. **Presidente do GROUND & LPE** (International Conference on Grounding & Lightning Physics and Effects) e editor associado do Journal of Lightning Research. Membro ativo do IEEE, da AGU e do CIGRE, onde coordenou grupos internacionais (WG C4.06 e C4.33). Consultor internacional nas áreas de Proteção contra Descargas, Aterramentos e Linhas de Transmissão.



Fernando H. Silveira possui graduação (1999), mestrado (2001) e doutorado (2006) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). É professor adjunto IV, 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 30 artigos em periódicos e 90 artigos em conferências. É membro do IEEE, sendo revisor regular do IEEE Transactions on Power Delivery e IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. É bolsista produtividade em pesquisa – nível 2 do CNPq e representante brasileiro dos grupos internacionais do CIGRE WG C4.37 (Electromagnetic Computation Methods for Lightning Surge Studies with Emphasis on the FDTD Method) e WG.C4.23 (Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines), e secretário do GT4 BR01 (Desempenho de Linhas de Transmissão frente a Descargas Atmosféricas) do CIGRE-Brasil.