



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

CB/GDS/02

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO - 10**

**GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS**

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA LPM (LEADER PROGRESSION MODEL)**

**PABLO M. MIGUEL (\*)**  
TGDELTA ENG. CONS. LTDA.

**DELMO M. CORREIA    ANTÔNIO CARLOS C. CARVALHO**  
**ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO**

**RESUMO**

O desempenho de linhas de transmissão (LTs) frente a impactos de descargas atmosféricas é atualmente efetuado com o uso do modelo eletrogeométrico (EGM na sigla em inglês – *Electrogeometric Model*), desenvolvido para LTs de tensão até 230 kV. Devido a sua funcionalidade, mesmo com o aumento dos níveis de tensão e da altura das torres, continuou-se a utilizar o EGM, sendo previsível uma discrepância entre os índices de desligamento por descargas atmosféricas reais e estimados. Para tensões mais elevadas, foi proposta uma metodologia denominada de modelo da progressão do *leader* (LPM na sigla em inglês – *Leader Progression Model*), que leva em conta fenômenos modelados de acordo com a física das descargas, como a ionização na superfície dos condutores ocasionada pela intensidade do campo elétrico. Dessa forma, a altura da linha de transmissão e o arranjo de condutores é parte intrínseca do método.

Assim como o EGM sofreu várias alterações da formulação da distância de salto, o LPM apresenta ainda diferentes vertentes, todas baseadas essencialmente nos seguintes fundamentos:

- Leader descendente – A carga elétrica acumulada numa nuvem dá origem a um canal ionizado que, dentro de determinadas condições, forma um canal estável que se propaga em direção ao solo;
- Transferência de carga da nuvem para o leader descendente;
- Campo elétrico produzido pelo leader descendente – A carga elétrica contida no canal ionizado, que forma o leader descendente, produz uma distribuição de campo elétrico no espaço entre a nuvem e o solo;
- Leader ascendente – A intensidade de campo elétrico na superfície dos condutores propicia a emissão e propagação de leaders ascendentes a partir das torres e dos cabos (condutores de fase e para-raios);
- Propagação dos leaders ascendentes – Conforme o leader descendente se propaga em direção ao solo, os diversos leaders ascendentes são iniciados e se propagam em direção ao leader descendente;
- Disrupção – A disrupção ocorre entre o leader descendente e um dos leaders ascendentes e a descarga se completa para o condutor ou eletrodo a partir do qual o leader ascendente foi iniciado;

O artigo apresenta aplicação a LTs 525 e 765 kV CA e 600 e 800 kV CC. Uma análise específica referente às falhas de blindagem é apresentada, sendo tabulados os impactos separados por cada condutor. Finalmente, com o objetivo final de avaliar se o uso de metodologia consagrada até hoje como o EGM traz resultados satisfatórios quando aplicada a LTs nesse nível de tensão ou se se faz necessária a introdução de metodologias mais complexas como o LPM, é feita uma comparação entre os índices de desligamento estimados por ambas as metodologias.

**PALAVRAS-CHAVE**

*Leader Progression Model*, LPM, Modelo Eletrogeométrico, EGM, Desempenho de Linhas de Transmissão

## 1.0 - INTRODUÇÃO

O desempenho de LTs frente a descargas atmosféricas é tradicionalmente estimado com a utilização do EGM. Essa metodologia se baseia na geometria das torres e, combinada com algumas observações empíricas sobre a formação das descargas atmosféricas, leva a uma estimativa da distribuição de impactos e do número esperado de desligamentos da LT devidos a descargas atmosféricas.

A metodologia usada no LPM, ao considerar em mais detalhe as etapas de formação e propagação do canal precursor da descarga, permite levar em conta o efeito da tensão à frequência industrial na captação de descargas atmosféricas pela linha. Apesar de mais robusto, o LPM ainda não é de uso comum nos projetos de LTs, sendo o EGM a metodologia mais usada.

O objetivo deste artigo é o de comparar os resultados encontrados com a aplicação do EGM e do LPM a geometrias típicas de linhas utilizadas no Brasil. Dessa forma, espera-se verificar se existe a real necessidade de utilizar o LPM e em que situações. Anteriormente [1], os autores verificaram que o LPM requer um esforço computacional muito elevado e que para linhas de transmissão de tensão até 525 kV AC, o EGM apresenta estimativas de taxas de desligamento por descargas atmosféricas mais elevadas do que o LPM. Contudo, para LTs de tensão acima de 525 kV, o LPM mostra que existe uma elevada taxa de desligamentos por falhas de blindagem que o EGM, devido aos fundamentos dessa metodologia, não pode detectar. A razão que leva a esse aumento dos desligamentos por falha de blindagem vem a ser o efeito da tensão à frequência industrial na emissão de leaders ascendentes a partir dos condutores de fase. Esse efeito, no entanto, só se torna relevante para LTs de tensão mais elevada ou com torres muito altas.

## 2.0 - FUNDAMENTOS DAS METODOLOGIAS EMPREGADAS

As metodologias analisadas neste artigo são o modelo eletrogeométrico (EGM) e o *leader progression model* (LPM).

### 2.1 EGM

O EGM, que tem forte componente empírico, foi desenvolvido originalmente para linhas 230 kV, passou por diversas evoluções ao longo do tempo, que visaram ajustar melhor as previsões aos índices de desempenho observados na prática. Com o advento de LTs em tensões mais elevadas, a metodologia foi ajustada, alterando-se a formulação da distância de salto.

As seguintes premissas formam a base do EGM:

- A descarga se forma e se propaga em direção ao solo em saltos;
- A distância de salto é correlacionada com a amplitude do pico da corrente da descarga;
- A descarga será completada para qualquer elemento condutor que esteja a uma distância igual ou inferior à distância de salto.

Diversas formulações para a correlação entre a amplitude da descarga e a distância de salto foram propostas, com o objetivo de mais bem ajustar o desempenho estimado às taxas de desligamento obtidas. Algumas dessas formulações incluem a altura da linha, numa tentativa de adequar o EGM a LTs em tensões mais elevadas. Algumas das mais usadas formulações são as seguintes:

- Em 1968, Armstrong & Whitehead [2] –  $r_s = 6,7 I^{0,8}$
- Em 1985, IEEE WG [4] –  $r_s = 8 \times I^{0,65}$
- Em 1987, Eriksson [5] –  $r_s = 0,67 \times h^{0,6} \times I^{0,74}$
- Em 1990, Rizk [6] –  $r_s = 1,57 \times h^{0,45} \times I^{0,69}$
- Em 1990, Deller & Garbagnati [7] –  $r_s = 3 \times h^{0,6} + 0,028 \times h \times I$
- Em 1997, IEEE WG [8] –  $r_s = 10 \times I^{0,65}$

Uma vez que a formulação da distância de salto tenha sido estabelecida, a determinação da região de captação de descargas se transforma em um problema geométrico. A região de captação é determinada para cada amplitude de corrente e o número de desligamentos estimado a partir do nível cerâmico ou densidade de descargas e da distribuição de probabilidades dos parâmetros da descarga (amplitude, frente de onda etc.). As taxas de desligamento por falha de blindagem (SFOR na sigla em inglês – *Shielding Failure Outage Rate*) e por *backflashovers* (BFOR na sigla em inglês – *Backflashover Outage Rate*) são estimadas a partir de:

$$SFOR = 2N_g L \int_{I_C}^{I_{MAX}} D_C(I) f(I) dI$$

$$BFOR = 2N_g L \int_{I_B}^{\infty} D_{BF}(I) f(I) dI$$

Onde  $N_g$  – densidade de descargas ( $m^{-2}$ ),  $L$  – comprimento da linha (m),  $I_C$  – menor valor de corrente para o qual pode ocorrer um desligamento por falha de blindagem ou seja, disrupção do isolamento (A),  $I_B$  – menor valor de corrente para o qual pode ocorrer um desligamento por backflashover, disrupção do isolamento (A),  $I_{MAX}$  – maior valor de corrente para o qual pode ocorrer uma falha de blindagem (A),  $f(I)$  – densidade de probabilidade de ocorrência da amplitude de corrente,  $D_C(I)$  – largura da região exposta para captação de descargas pelos condutores de fase (m) e  $D_{BF}(I)$  – largura da região exposta para captação de descargas pelos cabos guarda (m), conforme mostrado na Figura 1.

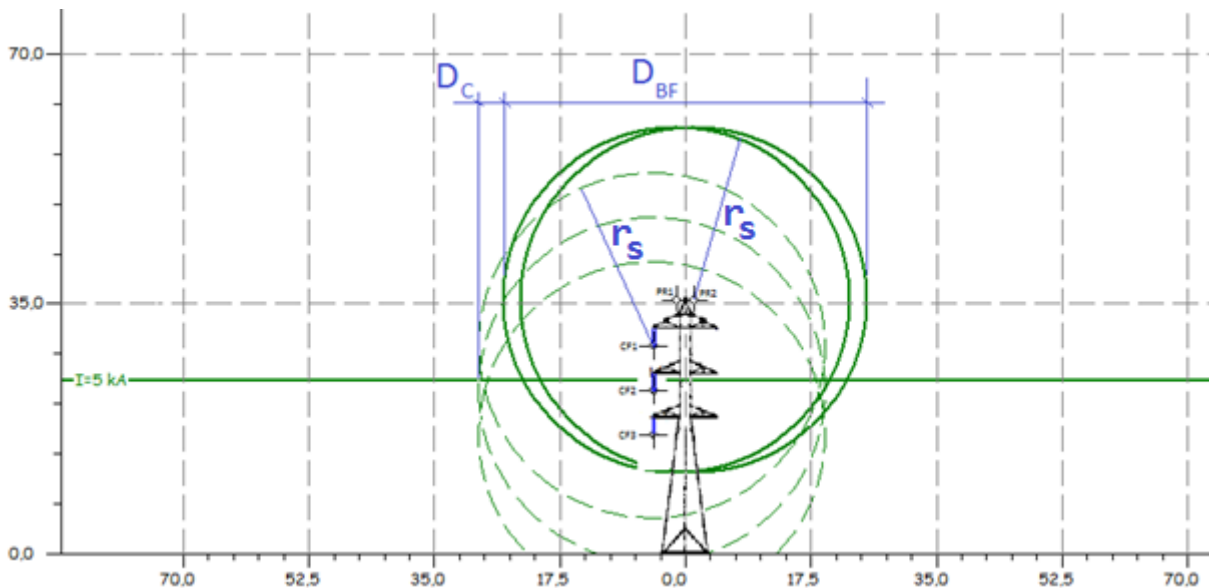


Figura 1 – Determinação da distância de captação de descargas pelo EGM

As diversas mudanças na formulação da distância de salto mostram as tentativas de adequar as estimativas obtidas às taxas de desligamento efetivamente observadas. A partir de 1980, observou-se a inclusão da altura da linha, numa tentativa de mais bem aproximar as taxas de desligamento das LTs 525 kV. De qualquer forma, o EGM não inclui nenhuma consideração da física das descargas na formação e propagação dos canais ionizados nem leva em consideração o efeito da tensão nos condutores no processo de atração dos raios.

## 2.2 LPM

Após 1990, com a disponibilidade de recursos computacionais mais amplos, ampliou-se a possibilidade de aplicação do LPM. Nesse método, conceitos de física da descarga são considerados na formação e propagação dos canais ionizados. As seguintes premissas caracterizam o LPM:

- *Leader* descendente – estabelece as condições para o surgimento e propagação do *leader* descendente a partir da carga acumulada na nuvem;
- *Leader* ascendente – A distribuição de campo elétrico gerado pela carga no *leader* descendente, juntamente com a tensão na frequência industrial, provoca ionização em regiões próximas à superfície dos condutores;
- Propagação dos *leaders* ascendentes – algumas das regiões ionizadas podem evoluir para um canal ionizado estável, que se propaga no sentido ascendente, em direção à extremidade do *leader* descendente;
- Estabelecimento da descarga – a descarga pode ser estabelecida para:
  - Solo – quando a tensão desenvolvida entre a extremidade do *leader* descendente e o solo exceder a suportabilidade de tensão;

- Condutor de fase, cabo guarda ou estrutura – quando a diferença de tensão entre a extremidade do leader descendente e a extremidade de um dos leaders ascendentes exceder a suportabilidade de tensão.

Como o objetivo é obter uma estimativa das taxas de desligamento, faz-se necessário considerar alguns conceitos utilizados no EGM:

- $I_{MAX}$  – Limite de falha de blindagem – No EGM este limite é muito bem definido, sendo avaliado geometricamente; no LPM esse conceito inexistente, posto que a falha de blindagem depende da emissão e propagação dos leaders ascendentes e não apenas da amplitude da corrente;
- $I_{BF}$  – Limite para falha por backflashover – esse limite depende essencialmente do aterramento e do número de isoladores na cadeia; continua a ser avaliado da mesma forma que no EGM;
- $D_C(I)$  – Distância de captação para falha de blindagem – no LPM esse conceito passa a medir a distância até a qual o leader descendente pode ter a sua trajetória alterada de forma a atingir um condutor de fase;
- $D_{BF}(I)$  – Distância de captação para backflashover – no LPM esse conceito passa a medir a distância até a qual o leader descendente pode ter a sua trajetória alterada de forma a atingir um cabo guarda ou estrutura.

O tempo de propagação do leader entre a nuvem e o solo varia em função da altitude da nuvem, da velocidade de propagação atribuída ao leader descendente e também da amplitude da corrente do raio. Os valores observados em diversas simulações variaram entre 6 e 52 ms. A Figura 2 ilustra a relação entre o tempo de propagação e a tensão nos condutores de fase no momento do impacto.

Como o tempo de propagação varia em um intervalo maior do que o período da frequência industrial, a tensão nos condutores de fase passa a ser aleatória. No momento de ocorrência de um impacto, a cadeia de isoladores fica submetida à diferença entre a tensão desenvolvida no topo da torre (devido à impedância de surto da torre e do sistema de aterramento) e a tensão no condutor. Dependendo da posição do instante de impacto na onda de tensão, a tensão aplicada à cadeia de isoladores será aumentada ou diminuída de um valor que pode alcançar o valor de crista da tensão fase-terra do sistema. Em sistemas de extra alta tensão (EAT) ou ultra alta tensão (UHT), esse valor de tensão começa a ser comparável ao valor da tensão desenvolvida no topo da torre pelo escoamento da corrente de surto.

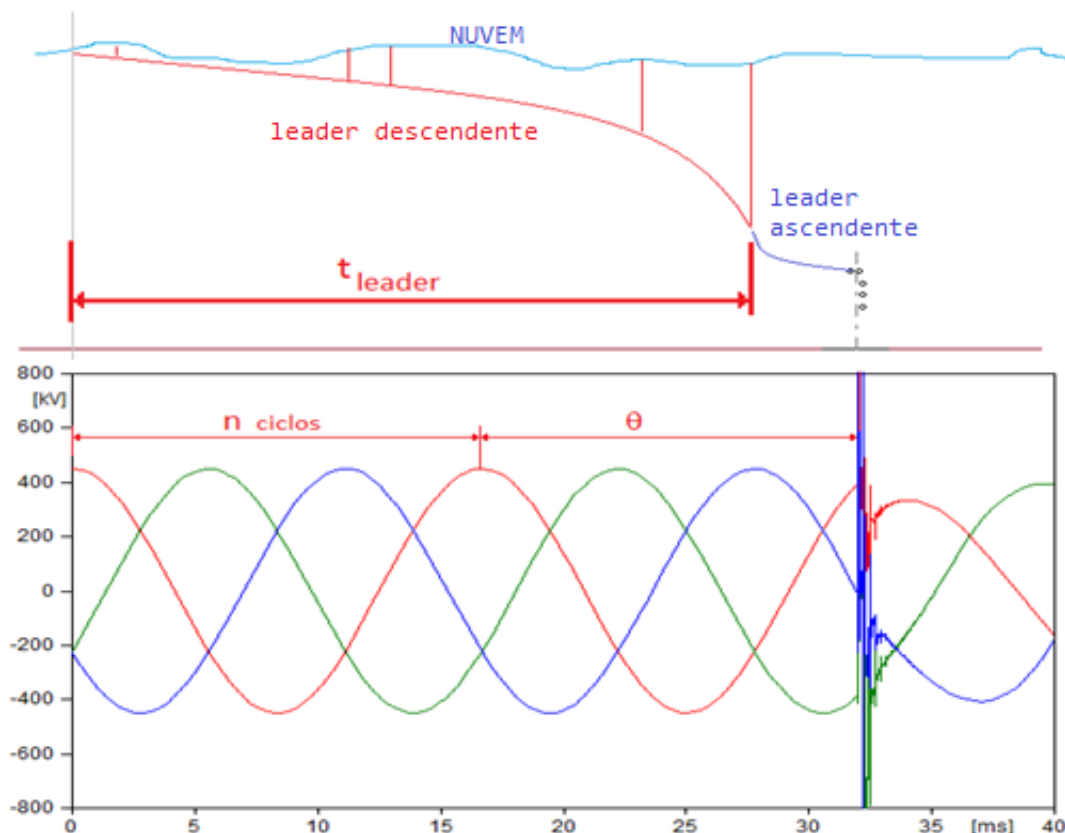


Figura 2: Visualização da tensão nos condutores de fase no momento de impacto

Um dos efeitos observados no LPM é que a tensão à frequência industrial tem um efeito considerável na ionização das regiões próximas à superfície dos condutores. Com níveis de tensão mais elevados, a intensidade de campo elétrico na superfície do condutor pode antecipar a formação e partida do canal *leader* ascendente em um condutor de fase. Com isso, um *leader* ascendente parte de um condutor de fase antes que um *leader* ascendente seja formado em um cabo guarda, podendo, em algumas situações, fazer com que a descarga seja atraída para um condutor de fase. Observa-se a possibilidade de ocorrência de falhas de blindagem para amplitudes de corrente bastante elevadas e que pelo EGM seriam consideradas uma impossibilidade.

A Figura 3 mostra como o efeito da tensão à frequência industrial pode fazer com que um *leader* ascendente possa ser emitido a partir de um condutor de fase antes de que o seja a partir dos cabos guarda. A intensidade de campo elétrico na superfície dos condutores será a soma vetorial dos campos produzidos pela carga elétrica contida no canal ionizado do *leader* descendente e o campo produzido pela tensão na frequência industrial.

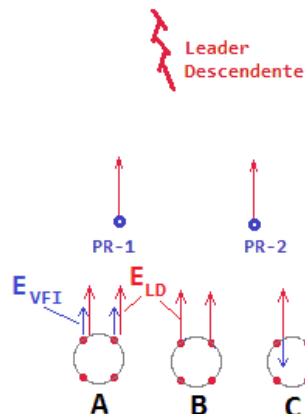


Figura 3: Efeito da tensão à frequência industrial na antecipação da emissão de *leaders* ascendentes

A Figura 4 ilustra o deslocamento da trajetória do *leader* descendente para uma linha 800 kV CC. A descarga com amplitude de 100,5 kA deveria atingir o solo a uma distância lateral de 80,5 m do eixo da linha. Com a linha energizada, a descarga acaba por atingir o condutor CF-1 (polaridade positiva). Com a linha desenergizada, a descarga atinge o cabo guarda PR-1. Para essa descarga, o EGM prevê um impacto no solo.

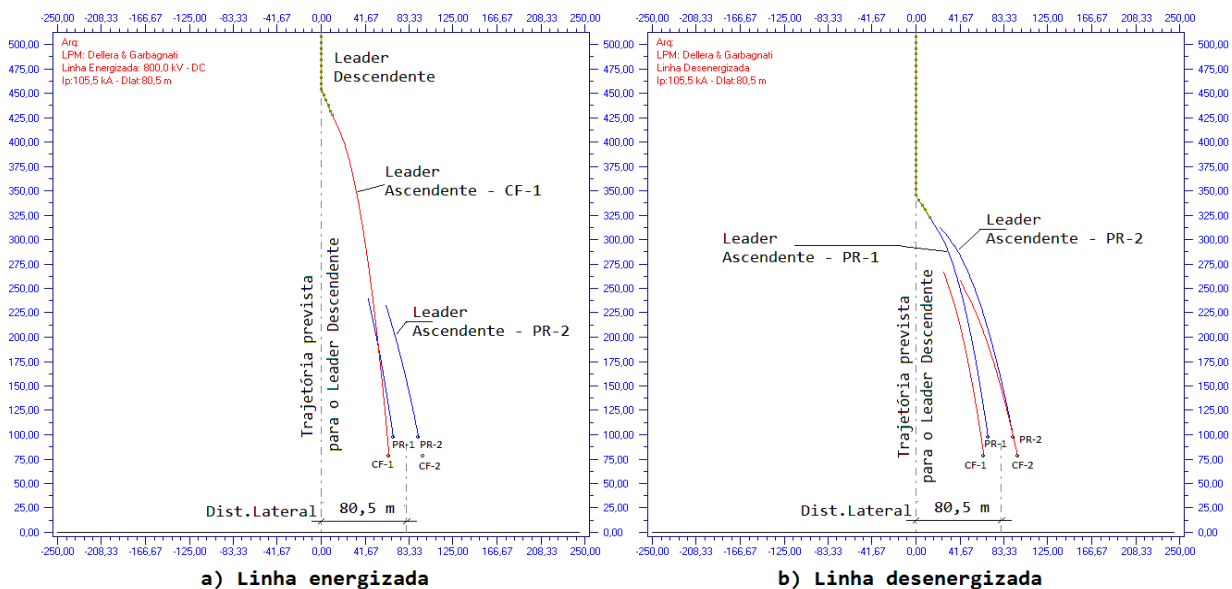


Figura 4: Deslocamento da trajetória do *leader* descendente pela presença da linha de transmissão

### 3.0 - COMPARAÇÃO ENTRE EGM E LPM

Como o objetivo deste artigo é estabelecer uma discussão sobre a real necessidade de utilização do LPM em substituição ao EGM, faz-se necessário proceder a uma comparação entre as duas metodologias. O EGM é uma metodologia solidamente estabelecida entre os projetistas de linhas de transmissão, sendo seu uso de conhecimento comum. Para a utilização do EGM, é distribuído sem garantias pelo IEEE o programa FLASH [8], que é bastante simples e não requer o uso intensivo de recursos computacionais. Tipicamente, o programa FLASH é executado em poucos minutos, sendo a parte mais trabalhosa a definição e inserção dos dados.

Já o LPM é ainda uma novidade, sendo de uso mais comum entre pesquisadores. A utilização do LPM requer a elaboração de um programa de aplicação, posto que ainda não existe nenhuma ferramenta gratuita distribuída para uso. Mesmo após a obtenção de um programa de cálculo baseado na metodologia LPM, a sua utilização demanda entre 2 e 8 horas de processamento para estimar a taxa de desligamentos de uma LT. Convém ressaltar que, para o LPM, existem diversas modelagens propostas [7][7][9], ou seja, o LPM está ainda em estágio pelo qual o EGM já passou, com as diversas revisões da formulação da distância de salto.

Tomando como base apenas o esforço computacional, poderia parecer que o EGM é a ferramenta mais adequada. No entanto, por não considerar a emissão dos *leaders* ascendentes a partir dos condutores de fase, o EGM fornece um resultado otimista no que diz respeito a falhas de blindagem. Nas linhas com tensão nominal até 345 kV, a utilização do EGM e do LPM não chega a apresentar resultados tão discrepantes, posto que o efeito da tensão na frequência industrial na emissão de *leaders* ascendentes é praticamente nulo. Nas tensões acima de 500 kV, a emissão de *leaders* ascendentes a partir dos condutores de fase faz com que o LPM obtenha resultados mais elevados para o número de falhas de blindagem.

A comparação entre as metodologias foi feita procedendo-se a simulações com o uso do método de Monte Carlo. Um vão de linha, com geometria de torre e arranjo de condutores típicos, foi submetido a um total de descargas geradas aleatoriamente para um período de 1000 anos. Esse período foi escolhido de forma a assegurar a estabilidade numérica dos resultados. Para cada descarga, são gerados aleatoriamente:

- A localização do ponto de impacto no solo, caso a linha de transmissão não estivesse presente;
- A amplitude da descarga e os tempos de frente e de cauda;
- Ângulo da tensão no instante da partida do *leader* descendente, apenas para o LPM.

O programa LPMODEL [10], elaborado para essas simulações, determina para cada descarga:

- Ponto de impacto da descarga segundo o EGM e o LPM: solo, cabo guarda, estrutura ou condutor de fase;
- Para cada impacto em condutor de fase:
  - Incrementa o contador de falha de blindagem;
  - Verifica se ocorre desligamento e incrementa o contador de desligamentos por falha de blindagem;
- Para cada impacto em estrutura ou cabo guarda:
  - Incrementa o contador de impactos na blindagem;
  - Verifica se ocorre desligamento e incrementa o contador de desligamentos por *backflashover*.

Ao final, o programa LPMODEL totaliza o número de impactos e determina as taxas de desligamento para a linha, estimadas segundo o EGM e LPM. A Tabela 1 e a Tabela 2 mostram a comparação entre os resultados obtidos com o EGM e LPM. Nessa comparação, foi usada a formulação estabelecida em [8] para o EGM, enquanto que, para o LPM, foi usado o modelo proposto por Rizk [9]. A densidade de descargas foi considerada 5,4 raios/km<sup>2</sup>/ano. A resistência de pé de torre, que influencia principalmente o número de descargas por *backflashover*, foi variada entre 10, 20 e 40 Ω. O intervalo de tempo considerado foi de 1000 anos.

A Tabela 1 compara as estimativas obtidas com EGM e LPM quando a linha está desenergizada. Nessa situação, a tensão à frequência industrial não atuará para ionizar a região na superfície dos condutores. Dessa forma, a emissão de *leaders* ascendentes é ocasionada apenas pela intensidade de campo elétrico devida à carga contida no canal do *leader* descendente. O que se verifica, no caso da linha desenergizada, é que o LPM apresenta estimativas mais baixas para as taxas de desligamento, em todas as tensões.

Tabela 1: Comparação entre EGM e LPM para linhas desenergizadas – desligamentos por 100 km por ano

Met	R <sub>PE</sub> (Ω)	230 kV CA		345 kV CA		525 kV CA		765 kV CA		600 kV CC		800 kV CC	
		SFOR	BFOR	SFOR	BFOR	SFOR	BFOR	SFOR	BFOR	SFOR	BFOR	SFOR	BFOR
EGM [8]	10	0	2,0	0	0,6	0	0	0	0,2	0	0	0,9	0
	20	0	10,0	0	6,2	0	3,0	0	0,3	0	1,4	0	1,1
	40	0	30,4	0	22,2	0	13,6	0,2	4,2	0	8,2	0	6,3
LPM Rizk [9]	10	0	1,4	0	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	0	7,2	0	4,2	0	2,6	0	0	0	0,8	0	0,1
	40	0	23,8	0	16,2	0	10,4	0	2,5	0	5,6	0	3,1
Isoladores por cadeia		14		18		24		42		34		46	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taxas de desligamento (desligamentos/100 km/ano)</li> <li>• Densidade de descargas – 5,4 raios/km<sup>2</sup>/ano</li> <li>• Intervalo de 1000 anos</li> </ul>													

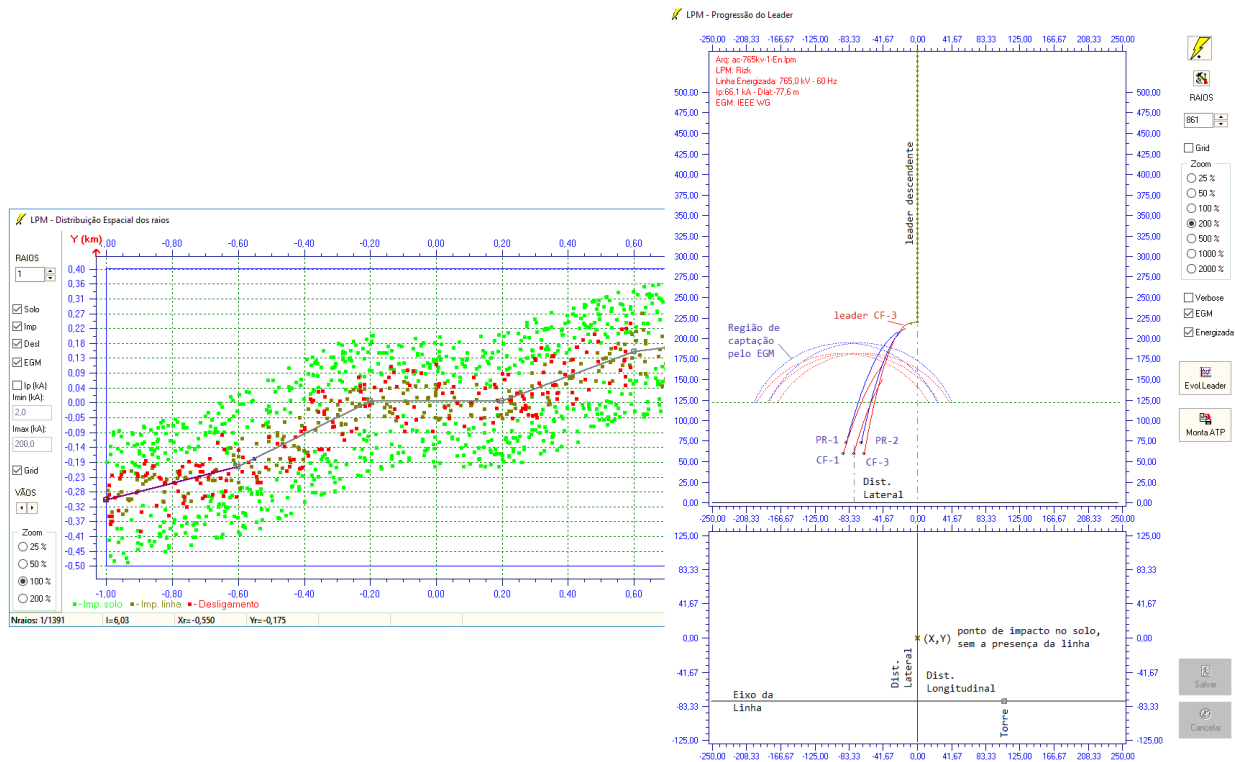


Figura 5: Visualização das descargas geradas e da simulação da propagação do *leader*

Tabela 2: Comparação entre EGM e LPM para linhas energizadas – desligamentos por 100 km por ano

Met	R <sub>PE</sub> (Ω)	230 kV CA		345 kV CA		525 kV CA		765 kV CA		600 kV CC		800 kV CC	
		SFOR	BFOR	SFOR	BFOR	SFOR	BFOR	SFOR	BFOR	SFOR	BFOR	SFOR	BFOR
EGM [8]	10	0	2,0	0	0,6	0	0	0	0,2	0	0	0,9	0
	20	0	10,0	0	6,2	0	3,0	0	0,3	0	1,4	0	1,1
	40	0	30,4	0	22,2	0	13,6	0,2	4,2	0	8,2	0	6,3
LPM Rizk [9]	10	0	1,4	0	0,2	0	0	8,7	0	10,9	0	48,0	0
	20	0	7,4	0	4,2	0	2,6	8,7	0	10,9	0,6	48,0	0,1
	40	0	24,0	0	16,8	0	10,6	8,7	2,2	10,9	4,2	48,0	1,4
Isoladores por cadeia		14		18		24		42		34		46	

A Tabela 2 compara o EGM e LPM considerando que a linha está energizada. No caso do EGM, a tensão à frequência industrial não apresenta nenhum efeito na captação das descargas, mas, uma vez que o impacto ocorra, essa tensão é considerada para verificar se ocorre ou não o desligamento. Já para o LPM, o campo elétrico produzido na superfície dos condutores pela tensão à frequência industrial se soma vetorialmente ao campo elétrico produzido pela carga elétrica contida no canal do *leader* descendente. A emissão de *leaders* ascendentes pode ser antecipada ou retardada, dependendo da polaridade da descarga e da tensão à frequência industrial. Pelo menos uma das fases apresentará polaridade oposta à da descarga e, nessa fase, um *leader* ascendente é emitido antes mesmo do surgimento de *leaders* ascendentes nos cabos guarda. Uma análise das taxas de desligamento estimadas, para a situação de linha energizada, mostra que para tensões até 525 kV, o LPM apresenta estimativas inferiores às obtidas com o uso do EGM. No entanto, para linhas de 765 kV CA e 600 e 800 kV CC, observa-se um crescimento expressivo no número de desligamentos por falha de blindagem (SFOR). Ocorre que a emissão antecipada de *leaders* ascendentes nos condutores de fase faz com que descargas com amplitude muito acima do limite de falha de blindagem ( $I_{MAX}$ ), previsto pelo EGM, sejam atraídas e captadas por um dos condutores de fase. Dessa forma, as cadeias de isoladores não são capazes de suportar a sobretensão e uma disrupção ocorre, forçando o desligamento da linha. Da mesma forma, a taxa de desligamentos por *backflashover* diminui, posto que algumas descargas que antes atingiriam a blindagem, agora são atraídas para um condutor de fase.

### 3.1 Verificação do efeito da altura da linha na aplicação do EGM e do LPM

Neste item será verificado o efeito da altura da linha. A Tabela 3 apresenta as estimativas obtidas com o EGM e o LPM para uma linha de 525 kV, considerando diversas alturas de torre. Observa-se que para o caso de torres com 100 m de altura e com a linha energizada, o LPM estima um aumento na taxa de desligamento por falha de blindagem (SFOR). Já com a linha desenergizada, o LPM apresenta estimativas mais baixas. Esse comportamento decorre do efeito da tensão na frequência industrial na emissão antecipada de leaders ascendentes a partir dos condutores de fase.

Tabela 3: Comparação para linhas CA 525 kV com diferentes alturas de torre – desligamentos por 100 km por ano

Met	R <sub>PE</sub> (Ω)	H=37,5 m Energizada		H=37,5 m Desenergizada		H=100 m Energizada		H=100 m Desenergizada	
		SFOR	BFOR	SFOR	BFOR	SFOR	BFOR	SFOR	BFOR
EGM [8]	10	0	0	0	0	3,9	0,1	3,7	0,1
	20	0	3,0	0	3,0	3,9	5,5	3,7	5,5
	40	0	13,6	0	13,6	3,9	21,4	3,7	21,4
LPM Rizk [9]	10	0	0	0	0	13,5	0	0	0
	20	0	2,6	0	2,6	13,5	1,6	0	2,8
	40	0	10,6	0	10,4	13,5	10,8	0	12,3

- Taxas de desligamento em desligamentos/100 km/ano
- Densidade de descargas – 5,4 raios/km<sup>2</sup>/ano
- Intervalo de 1000 anos
- H – Altura máxima da torre

### 4.0 - CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma comparação entre duas metodologias disponíveis para a estimativa das taxas de desligamento de LTs originado a partir de descargas atmosféricas: o tradicional EGM [8] e o LPM [9].

O EGM é a metodologia empregada atualmente, sendo bastante conhecido. O EGM sofreu várias reformulações ao longo do tempo, de forma a adequar as estimativas das taxas de desligamento ao que se observava no desempenho real. O EGM é de simples aplicação, existindo o programa FLASH, que é a ferramenta usualmente utilizada. distribuído sem garantias pelo IEEE [8].

Por sua vez, o LPM é uma metodologia ainda em desenvolvimento, existindo várias vertentes. O LPM requer um esforço de processamento computacional considerável. Não existe ainda nenhum programa gratuito oferecido para uso pela comunidade de projetos. Em trabalho anterior [1], os autores testaram algumas das principais vertentes existentes. Assim, neste trabalho a vertente de LPM utilizada foi a modelagem proposta por Rizk [6], que fornece um balanceamento adequado entre a representatividade dos resultados e a capacidade de processamento computacional requerido.

Considerando o esforço computacional requerido pelo LPM e o fato de existir um programa gratuito para o uso do EGM, deve-se questionar a real necessidade do uso do LPM. Para isso, faz-se necessário verificar a diferença entre as estimativas obtidas com cada uma das metodologias. O EGM [8] e o LPM [6] foram então aplicados a diversas LTs com os arranjos típicos usados no sistema interligado. As taxas de desligamento estimadas levam às seguintes constatações:

- Para LTs com tensões até 525 kV, o EGM fornece estimativas de taxas de desligamento mais elevadas do que o LPM;
- Para LTs 765 kV CA e 600 e 800 kV DC, o LPM fornece estimativas de taxas de desligamento por falha de blindagem (SFOR) bastante mais elevadas do que as obtidas com o uso do EGM;
- Ao utilizar conceitos da física das descargas, o LPM considera o efeito da intensidade de campo elétrico na superfície dos condutores, para a emissão dos leaders ascendentes, fazendo com que para essas tensões mais elevadas venham a ocorrer impactos de descargas com elevada amplitude em condutores de fase;
- O EGM não considera o efeito da tensão na frequência industrial na atração das descargas, assim estabelece o conceito da existência de uma corrente máxima para a ocorrência de falhas de blindagem;
- O LPM deixa patente a limitação de aplicação do conceito da existência de um limite superior para a corrente na situação de falha de blindagem para LTs 765 kV CA e 600 e 800 kV DC, posto que nesse nível de tensão, a emissão de leaders ascendentes a partir dos condutores de fase pode fazer com que descargas com elevada amplitude de corrente venham a provocar uma falha de blindagem;



As conclusões sobre a necessidade de aplicação do LPM são:

- A utilização do LPM não se mostra necessária para LTs até 525 kV AC, desde que essas linhas apresentem torres com altura típica;
- Para LTs 525 kV com torres muito altas, acima de 70 m, convém que seja verificado o desempenho da LT pelo LPM;
- Para LTs 765 kV CA e 600 e 800 kV DC, a utilização do LPM é recomendável;
- É recomendável que seja acompanhado o desempenho de LTs 765 kV CA e 600 e 800 kV DC, com a tabulação dos desligamentos originados a partir de descargas atmosféricas observados e a manutenção de informações sobre as resistências de aterramento das torres, no sentido de confirmar a taxa de desligamentos estimada pelas metodologias EGM e LPM, bem como validar a modelagem proposta por Rizk [6].

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Miguel P.M., Correia D.M., Carvalho A.C. – “Application of the Leader Progression Model to evaluate the lightning performance of AC and DC EHV transmission lines”, CIGRE Bienal 2016, Paris, Paper C4-022, August 2016.
- [2] Armstrong H.R., Whitehead E.R. – “Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding”, IEEE Transactions on PAS, vol. PAS-87, pp 270-281, 1968.
- [3] Brown G.W., Whitehead E.R. – “Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding: Part II”, IEEE Transactions on PAS, vol. PAS-88, pp 617-626, 1969.
- [4] IEEE Working Group on Estimation of Lightning Performance of Transmission Lines – “A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines”, IEEE Transactions on PAS, vol. PAS-104 No. 4, pp 919-932, April 1985.
- [5] Eriksson A.J. – “An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis”, IEEE Transactions on PWRD, vol. 2, pp 871-886, July 1987.
- [6] Rizk F.A.M. – “Modelling of Transmission Line Exposure to Direct Lightning Strokes”, IEEE Transactions on PWRD, vol. 5 No. 4, pp 1983-1997, October 1990.
- [7] Dellera L., Garbagnati E. – “Lightning stroke simulation by means of the leader progression model, Parts I and II”, IEEE Transactions on PWRD, vol. 5 No. 4, pp 2009-2029, October 1990.
- [8] IEEE Std 1243-1997 – “IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines”.
- [9] Whitehead E.R. – “CIGRE Survey of the Lightning Performance of Extra-High-Voltage Transmission Lines”, Electra, No. 33, pp 63-74, 1974.
- [10] Miguel P.M. – LPMODEL – processo BR 51 2014001190 9 – INPI – depósito do programa no INPI

#### 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Pablo Mourente Miguel, brasileiro naturalizado, nascido em 1951.

Engenheiro Eletricista (1975) pela UFRJ, Mestre (1981) e Doutor (1984) em Ciências da Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ.

Área de atuação: Transitórios eletromagnéticos, coordenação de isolamento e proteção de sistemas elétricos. Para maiores detalhes, consultar <http://lattes.cnpq.br/6049316115897758>



Delmo de Macedo Correia, nascido em 1953 no Rio de Janeiro, é engenheiro eletricista pela UFF em 1975, mestre em sistemas de potência pela UFPE em 1992 e doutor em eletrotécnica teórica pela Universidade Técnica de Hamburg em 1998. Membro do CIGRÉ, suas áreas de interesse são qualidade de energia, engenharia de equipamentos e compatibilidade eletromagnética. Trabalhou em estudos de engenharia na IESA, Themag e projetos de P&D na UFPE e na USP. Trabalha atualmente no ONS.



Antônio Carlos C. de Carvalho, nascido em 1955 no Rio de Janeiro, é engenheiro formado em 1978 na UFRJ e mestre em sistemas de potência pela COPPE/UFRJ (1984). É membro do CIGRE e é especializado na interação equipamentos-rede. Trabalhou com P&D no CEPEL e em desenvolvimento de equipamentos na ABB. Atualmente ocupa a Gerência de Padrões de Desempenho e Requisitos Mínimos da Rede Básica no ONS.