



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

CB/GDS/01

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO - GDS**

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

**ESTIMATIVA DO *BUFFER* EM LINHAS DE TRANSMISSÃO A PARTIR DE UM MODELO DE ALTURA DO CENTRO DE CARGA NEGATIVA EM TEMPESTADES**

**Armando Heilmann (\*)**

Universidade Federal do Paraná – CEM/UFPR

**Eduardo Alvim Leite**

Sistema Meteorológico do Paraná - SIMEPAR

**RESUMO**

A previsão probabilística da incidência direta ou indireta de descargas atmosféricas em linhas de transmissão, tem se mostrado um importante campo de interesse, sobretudo para as concessionárias de energia elétrica. Para relacionar esta probabilidade com a estrutura física de uma linha de transmissão, é necessário definir um *buffer*, que corresponde um invólucro espacial e longitudinal, ao longo de um segmento da rede e que é usado em modelos de previsão da ocorrência de raios próximos, direta ou indiretamente nas linhas. Assumimos algumas condições de atratividade da linha como uma presença de um centro de cargas negativas numa tempestade. Considerando a maior ocorrência de descargas tipo nuvem-solo, originárias de um centro de cargas negativas, exploramos algumas características eletrostáticas de tempestades que são importantes para deduzir o *buffer* numa linha de transmissão. Um modelo que estima o centro de cargas negativo de uma nuvem de tempestade foi proposto. Usamos o modelo de raio de atração para estimar o tamanho do *buffer* e listamos sua dimensão como função da altura do centro de cargas da nuvem, do pico de corrente elétrica médio das descargas atmosféricas da região e da permissividade elétrica. Este modelo proporciona melhorias aos sistemas de previsão probabilístico de incidência de raios em linhas de transmissão.

**PALAVRAS-CHAVE**

Descargas atmosféricas, *buffer*, linhas de transmissão, cargas negativas, tempestades

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Muitos modelos tratam de descrever os mecanismos dos processos de eletrização das nuvens de tempestade, outros ainda tratam da distribuição de cargas dentro da nuvem, estabelecendo melhorias do entendimento da estrutura elétrica das nuvens.

As principais quantidades de carga elétrica estão localizadas particularmente nas alturas das isotermas, que variam de -10 °C e -25 °C (7), a concentração de cargas, intensidade e posicionamento dentro da nuvem varia de acordo com o tipo de tempestade, condições de evolução, estações do ano, localização geográfica e particularmente da latitude (14).

O modelo mais aceito e considerado neste trabalho é o modelo de tripolo elétrico, no qual as cargas negativas estão organizadas na região da isoterma. Mais acima, em torno de 2 a 3 km encontra-se uma região de cargas positivas enquanto na região mais baixa da nuvem, conhecida por estar próximo à base da nuvem encontram-se quantidades menores de cargas positivas. Nas camadas mais externas da nuvem se desenvolve uma blindagem, onde ocorre a captura de íons por gotículas de água que se movem ao longo do campo em direção a um dos principais centros de cargas (6).

Sabe-se que é necessário um mínimo de campo elétrico para ionizar o ar e iniciar uma propagação estável de um

(\*) Rua Rio Grande do Norte, s/nº – CEP 83255-000, Pontal do Paraná, Mirassol/PR, – Brasil  
Tel.: (+55 41) 99625-2380 – Fax: (+55 41) 3320-2064 – E-mail: heilmann@ufpr.br

leader descendente carregado negativamente a partir da nuvem e conseqüentemente uma descarga atmosférica. Consideramos neste trabalho um campo elétrico de *Breakdown*, aquele necessário para ocorrer uma ruptura dielétrica e iniciar uma propagação de um (leader) negativo, da ordem de  $3.14 \times 10^6$  V/m (9). A maioria das descargas do tipo nuvem-solo possuem polaridade negativa e portanto, estas descargas estão associadas com o centro de cargas negativas da nuvem, as descargas nuvem-solo com polaridade positiva correspondem a menos de 10% dos casos (14).

Quando as descargas atmosféricas do tipo nuvem-solo atingem linhas de transmissão pode ocasionar perturbações, falhas e interrupções na transmissão de energia. Linhas de transmissão possuem grande extensão e alturas elevadas em relação ao solo e portanto, determinam uma área de incidência de descargas atmosféricas. Isto resulta num notável aumento de desligamentos destas linhas devido as sobretensões nos isoladores (2).

O desligamento de uma linha pode motivar a interrupção de processos produtivos industriais sobre uma macrorregião, comprometer equipamentos de saúde hospitalares, policial e defesa civil. Segundo estatísticas das concessionárias de energia elétrica, as descargas atmosféricas são responsáveis por cerca de 70 % dos desligamentos dos sistemas de transmissão.

Esta estatística apresenta variâncias dependendo da região no qual estão localizadas as linhas de transmissão. A região Oeste do estado do Paraná apresenta, segundo dados da RINDAT (Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas), uma densidade de descargas da ordem de 14 raios/km<sup>2</sup>/ano. Em algumas regiões do território brasileiro os índices de densidade de raios pode chegar a 27 raios/km<sup>2</sup>/ano, sendo a média do Brasil de 7 raios/km<sup>2</sup>/ano, segundo o ELAT (Grupo de Eletricidade Atmosférica).

Para melhorar as condições da probabilidade de ocorrência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão de energia elétrica, o Sistema Meterológico do Simepar - SIMEPAR em conjunto com pesquisadores do Grupo de Pesquisa em Tempestades e Descargas Atmosféricas da Universidade Federal do Paraná - UFPR, propõem um modelo para estimar a altura do centro de cargas negativas das nuvens de tempestade sobre a região, e a partir deste modelo inferir uma região espacial ao redor da linha de transmissão, denominada *buffer*, para o qual ocorrência das descargas atmosféricas tem maior probabilidade de atingir direta ou indiretamente a linha, ocasionando os desligamentos do sistema.

Na próxima seção introduziremos o conceito de *buffer* numa linha de transmissão. Na seção 3 apresentamos o modelo de altura de cargas negativas em nuvens de tempestade e a dedução do *buffer* da linha de transmissão. Na seção 4 mostramos alguns resultados numéricos que validam o modelo de altura de cargas negativas e algumas variações do *buffer* da linha de transmissão. Na última seção serão feitas as conclusões e diretrizes tomadas a partir deste trabalho.

## 2.0 - CONCEITO DE *BUFFER* EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

A técnica de inferência probabilística da ocorrência de descargas atmosféricas sobre uma linha de transmissão, tem se mostrado de grande interesse principalmente às concessionárias de energia elétrica. Existem poucos modelos que tratam desta técnica e nenhum ainda totalmente operacional, isto devido ao alto grau de incerteza associado a localização de uma descarga. Outros fatores colaboram para dificultar o processo de previsão de descargas atmosféricas em linhas de transmissão, como por exemplo as propriedades ambientais (topografia, climatologia, sazonalidade dos eventos) e as propriedades das estruturas físicas das linhas (diferenças nas alturas das torres de transmissão, espaçamento entre os cabos, presença de um ou mais cabos para raios) (2).

A região em volta de uma linha de transmissão que se estende longitudinalmente é denominada *buffer* e corresponde a uma área espacial dentro do qual existe maior probabilidade de ocorrências de descargas atmosféricas. O conhecimento mais aprimorado possível desta área permite estabelecer a razão das taxas de falhas nas linhas de transmissão pelo número de descargas atmosféricas que ocorreram sobre aquela região (10).

Alguns modelos de previsão da probabilidade de ocorrência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão são citados em Chowdhuri (1989), Iribarne e Cho (1980) e Crowley (2011), e tal qual consideram um *buffer* da linha, como indicador para a incidência de descargas diretas ou indiretas no sistema elétrico.

O modelo de previsão que adotaremos neste contexto é um modelo de *buffer* da linha que está associado a estimativa teórica da altura do centro de cargas negativas das nuvens de tempestade. Este modelo de *buffer* iguala as distâncias entre o ponto de origem da descarga, o qual consideraremos como sendo o ponto de propagação de um leader, ao cabo guarda da linha de transmissão. Neste trabalho no entanto deduzimos o *buffer* da linha como uma relação trigonométrica entre a distância entre o ponto de propagação de um leader ao cabo guarda da linha de transmissão, e a distância da base da torre de transmissão até o ponto de propagação de um leader.

Esta consideração na dedução do *buffer* das linhas de transmissão é porque será admitido a inclusão de um raio de atração nos cálculos do *buffer* da linha e a precessão da distância da base da torre de transmissão até o ponto de propagação do leader será considerado como um modelo de *buffer* da linha.

## 3.0 - MODELO DE ALTURA DE CARGAS NEGATIVAS EM NUVENS DE TEMPESTADE

Uma descarga atmosférica do tipo nuvem-solo se inicia com a propagação de um leader descendente, entre 1ms e 1,2ms, que sob influência de um campo elétrico capaz de permitir a quebra da rigidez dielétrica do ar da ordem de  $3.14 \times 10^6$  V/m, propaga-se com carga negativa a partir da base da nuvem de tempestade rumo ao solo (9).

As medidas destas características eletrostáticas da atmosfera são feitas, basicamente, usando medidos de campo elétrico, radiosondagens e redes de radares.

A distribuição das tempestades, sua intensidade e concentração de cargas no interior variam de acordo com sua dinâmica, estações do ano, posição geográfica e latitude, no entanto existem padrões de reconhecimento da dinâmica das tempestades e as teorias de eletrificação das nuvens oferecem modelos que permitem caracterizar a distribuição de cargas numa tempestade.

O modelo mais aceito de eletrificação das tempestades é o modelo tripolar que admite uma separação de cargas no interior das nuvens de tempestades em 3 níveis. No topo das nuvens ocorre a concentração de cargas positivas, no centro e próximo a base da nuvem ocorrem concentrações de cargas negativas, e mais na base da nuvem uma concentração pequena de cargas positivas. Uma variedade de alturas para o centro de cargas negativas é relatado por Stolzenbrg et. at., (1998), contudo o processo de eletrificação é similar para ambos os modelos de eletrificação bipolar/tripolar com concentração de cargas negativas entre  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  (7,8,11).

Alguns modelos determinam a altura do centro de cargas negativas nas tempestades através de equação empíricas considerando a base da nuvem como sendo a região de cargas negativas, e utilizam a temperatura da superfície e a temperatura do ponto de orvalho, ou usam a interpolação de dados de radiosondagem (11). O modelo a seguir considera que, basicamente a altura do centro de cargas da nuvem é uma função do campo elétrico de *breakdown*, permissividade elétrica e pico de corrente médio das descargas atmosféricas que ocorrem sobre a região que se pretende estimar o *buffer* da linha de transmissão.

O valor do campo elétrico de *breakdown* será de  $3.14 \times 10^6\text{ V/m}$  e é admitido, também nos estudos sobre a origem da propagação de streamers e dos fenômenos transientes luminosos acima das tempestades (3,13). Assumiremos uma expressão para o campo elétrico numa atmosfera carregada eletricamente como uma média do campo gerado pelo dipolo elétrico, de modo que  $\vec{E}_{total} = |E_{d/2}|$ , ver FIGURA 1.

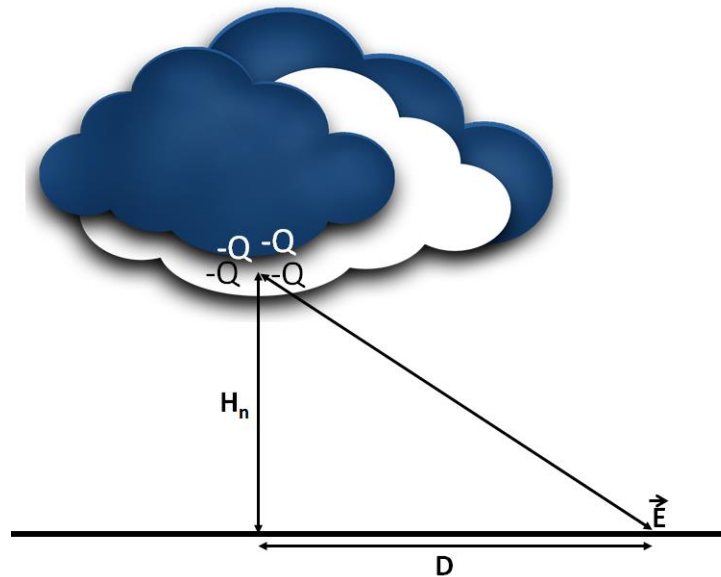


FIGURA 1 – Método da carga imagem para estimativa do campo elétrico e da altura do centro de carga na tempestade.

Vamos assumir que a descarga percorre um caminho perpendicular ao solo de modo que podemos usar o modelo de campo elétrico resultante num ponto próximo à superfície do solo, conforme a equação 1:

$$|E_B| = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o} \frac{1}{(H_t^2 + D^2)}. \quad (1)$$

Fazendo  $D = 0$  orientamos a descarga no sentido ortogonal a superfície terrestre, então:

$$|E_B| = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o} \frac{1}{H_t^2}, \quad (2)$$

onde  $E_B$  é o campo elétrico de *breakdown* ( $3.14 \times 10^6\text{ V/m}$ ),  $\epsilon_o$  é a permissividade elétrica ( $8.8541878176 \times 10^{-12}\text{ F/m}$ ) e  $H_t$  é a altura total do centro de cargas negativas da tempestade em metros. Admitindo o conceito de carga imagem, fazemos,  $H_t = (H_n/2)$ , e  $H_t$  [m] é a variável que corresponde a altura do centro de cargas negativas da tempestade.

A propagação de um leader descendente supõe a ramificação do canal negativo e a carga envolvida ( $Q_{fp}$ ) é, portanto, distribuída ao longo de todas as ramificações (8,12). Isto está de acordo com os dados de campo disponíveis, os quais indicam que o valor do pico de corrente de uma descarga atmosférica aumenta com o aumento do número de ramificações pelo canal de descida (13,14).

Como estamos considerando os instantes iniciais de propagação do leader descendente, para determinar um modelo de altura do centro de cargas negativas e admitindo que a corrente elétrica avança, e se distribui em igual intensidade no canal ionizado pelo leader descendente, aproximamos a quantidade de carga  $Q$  na equação 2 por uma relação média por unidade de comprimento do canal da descarga. Delara (1990) fez algumas estimativas consistentes com os menores valores de carga deslocadas ao longo do canal que corresponde ao pico de corrente das descargas negativas e as simulações do leader descendente mostram que uma densidade linear de carga no início da propagação do leader pode ser dada como (equação 3):

$$\int dQ_{fp} = \int (76I^{0.68}10^{-3}) dl, \quad (3)$$

onde  $Q_{fp}$  é a quantidade de carga elétrica [C] distribuída ao longo do comprimento do leader ( $dl$ ) em [m], e  $10^{-3}$  tem dimensão de s/m.

Todavia, como temos interesse somente no centro de cargas negativas da tempestade, devemos nos assegurar que a propagação do leader para grandes espaçamentos do ar, seja tal que, a densidade linear de carga  $dQ/dl$  dos leaders negativos sejam maiores do que a densidade linear de carga  $dQ/dl$  dos leaders positivos. Fazendo  $Q = \int dQ_{fp}$ , tomamos o comprimento de 1m do canal pelo qual o leader descendente iniciou sua propagação até o solo, e a equação 3 pode ser simplificada como:

$$Q = 76 \times 10^{-3} I^{0.68}, \quad (4)$$

sendo  $Q$  a carga elétrica em [C],  $I$  o pico de corrente no solo (medido por sistemas de monitoramento de descargas atmosféricas) em [kA] e  $76 \times 10^{-3}$  o tempo de propagação inicial do leader descendente em [s].

Admitindo o campo elétrico de *breakdown* ( $3.14 \times 10^6$  V/m), substituímos a equação 4 em 2, de modo que:

$$H_n = \sqrt{\frac{76 \times 10^{-3} I^{0.68}}{\pi \epsilon_o |E_B|}} \quad (5)$$

Esta é a expressão para a estimativa da altura do centro de cargas negativas em tempestades com presença de descargas atmosféricas, sendo função somente do pico de corrente elétrica médio medido no solo pelos sistemas de monitoramento [kA], permissividade elétrica e campo elétrico de *breakdown*.

A FIGURA 2 mostra a estimativa da altura do centro de cargas negativa em nuvens de tempestade, considerando a equação 5, ver FIGURA 2.

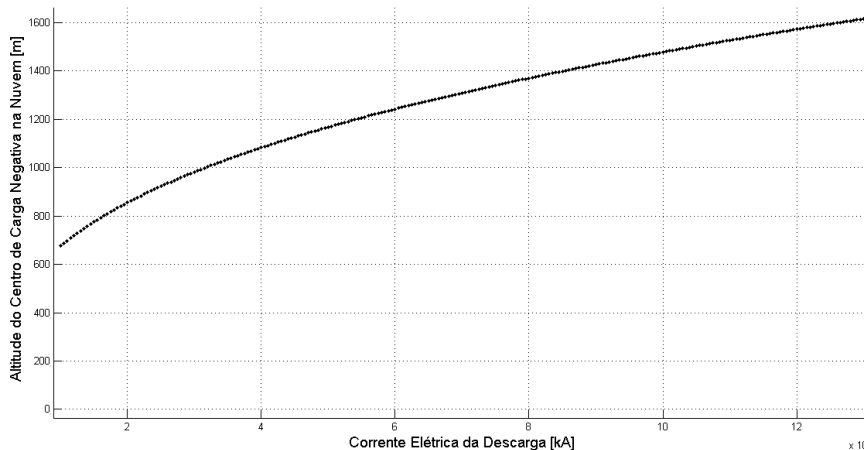


FIGURA 2 – Estimativa da altura do centro de cargas negativas em tempestades como função do pico de corrente elétrica da descarga (nuvem-solo).

A altura do centro de cargas negativas na nuvem de tempestade depende do registro do pico de corrente em solo, uma vez considerado que este registro coincide com o valor de corrente elétrica nos instantes iniciais de propagação do leader descendente.

#### 4.0 - DEDUÇÃO DO *BUFFER* EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Para estimar o *buffer* de uma linha de transmissão temos que considerar um fator adicional nos cálculos, o raio de atração. Por definição o raio de atração é uma distância entre o canal descendente e a estrutura terrestre, a partir do qual existe a probabilidade de ocorrer o fechamento do trajeto da descarga atmosférica pela conexão entre o canal descendente e o canal ascendente, que por sua vez pode ter origem na própria torre de transmissão (4).

Algumas expressões são sugeridas na literatura para o cálculo do raio de atração como função do pico de corrente elétrica da descarga. Para este trabalho sugerimos um modelo proposto por A. J. Eriksson com base no Modelo de Progressão do Canal Precursor de Descargas Descendentes, dado como  $R_a = 14h_T^{0.6}$ , onde  $h_T$  é a altura da torre de transmissão [m] (5).

A adoção do conceito de atração torna possível definir as regiões de incidência nas estruturas de transmissão de energia elétrica, e portanto, será igualmente considerado no cálculo do *buffer* de linhas de transmissão. A FIGURA 3 mostra a relação entre o raio de atração ( $R_a$ ) e as alturas do centro de cargas negativa e da torre, respectivamente em [m], ver FIGURA 3.

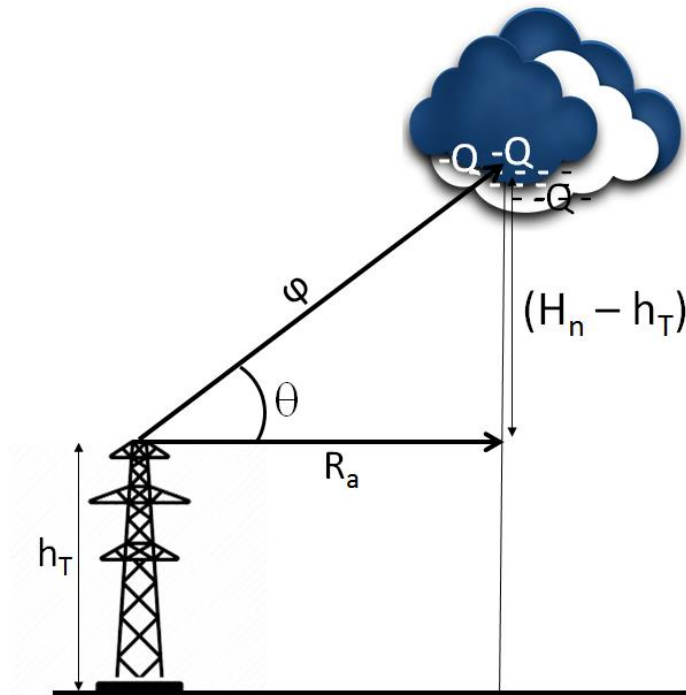


FIGURA 3 – Estimativa da altura do centro de cargas negativas em tempestades como função do pico de corrente elétrica da descarga (nuvem-solo).

A grandeza  $\varphi$  como função do pico de corrente média das descargas em [m], refere-se a distância estimada entre o cabo para raio da estrutura até o centro de cargas negativas da tempestade, e cuja relação válida é:

$$\varphi(I_m) = \sqrt{(H_n - h_T)^2 + R_a^2}. \quad (6)$$

Isto resulta numa triangulação que assume como um dos seus catetos a própria estrutura da torre de transmissão, ver FIGURA 4.

Uma nuvem de tempestade pode estar muito próxima ou muito afastada da linha de transmissão, isto impacta no cálculo do *buffer* da linha. Considerando a maior probabilidade de descargas sobre uma linha de transmissão de tempestades mais próximas, simulamos as distâncias mínimas  $\varphi$  através das equações 5 e 6, e conseguimos calcular uma variação dos possíveis ângulos que  $\varphi$  pode assumir, como função da mínima distância da tempestade até a linha de transmissão, admitindo uma corrente elétrica média das descargas ~ 60 kA, (ver TABELA 1 e 2), para diferentes alturas de torres.

TABELA 1 – Ângulos mínimos para tempestades próximas da torre de transmissão.

ÂNGULO $\theta$ [°]	TORRE [m]	$\varphi$ [m]
86.23	20	1225
84.34	30	1218
82.42	40	1213
80.48	50	1209
78.52	60	1206

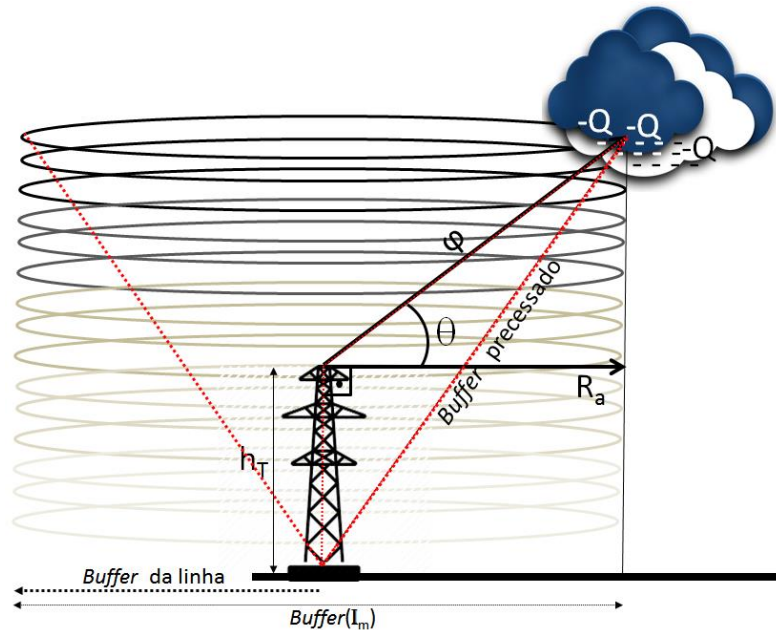


FIGURA 4 – Relação trigonométrica do *buffer* da linha de transmissão e a precessão em torno da torre de transmissão.

Ou seja, tempestades que estão localizadas as distâncias iguais a  $\varphi$ , conforme mostradas na TABELA 1, apresentam condições eletrostáticas suficientes para registrar descargas elétricas com picos de corrente de  $\sim 60$  kA na região das torres.

As características que incluem a altura da estrutura em relação ao solo é definido tomando a relação trigonométrica da lei dos cossenos, pela qual estima-se um *buffer* da linha de transmissão [m], precessado em torno da torre de transmissão. Portanto, não se trata de projetar o *buffer* projetado em direção ao solo. O correto é considerar um *buffer* médio para se obter as distâncias a partir da base da torre como sendo a distância de maior probabilidade de incidência de descargas atmosféricas. Como o valor de  $\theta$  deve ser somado ao ângulo ortogonal formado pela relação do raio de atração com a altura da torre, então:

$$Buffer(I_m) = \sqrt{\varphi^2 + h_T^2 - 2\varphi * h_T \cos(\theta + 90^\circ)}, \quad (7)$$

onde

$$Buffer = \frac{Buffer(I_m)}{2}. \quad (8)$$

A equação anterior representa o *buffer* de uma linha de transmissão como função do pico de corrente média das descargas atmosféricas na região das torres de transmissão. O modelo geoeletromagnético de incidência de descargas em estruturas e redes elétricas de transmissão, usa o conceito de raio de atração devido a necessidade de incluir simetria axial na geometria da linha. Pelo raio de atração na linha de transmissão, consideramos que as descargas indiretas também contribuem significativamente para os desligamentos das linhas de transmissão, e portanto, a região de probabilidade para a incidência de descargas atmosféricas também deve admitir os efeitos indiretos.

## 5.0 - RESULTADOS NUMÉRICOS DO MODELO

A altura do centro de cargas negativas em tempestades varia de 675 m acima do solo, até 1620 m, dependendo do pico de corrente registrado em solo. Tomando uma média de registros do pico de corrente em 60 kA, segundo o modelo, a altura do centro de cargas negativa na nuvem é de 1240 m. Esta altura é condizente com os valores apresentados na literatura, ver FIGURA 5.

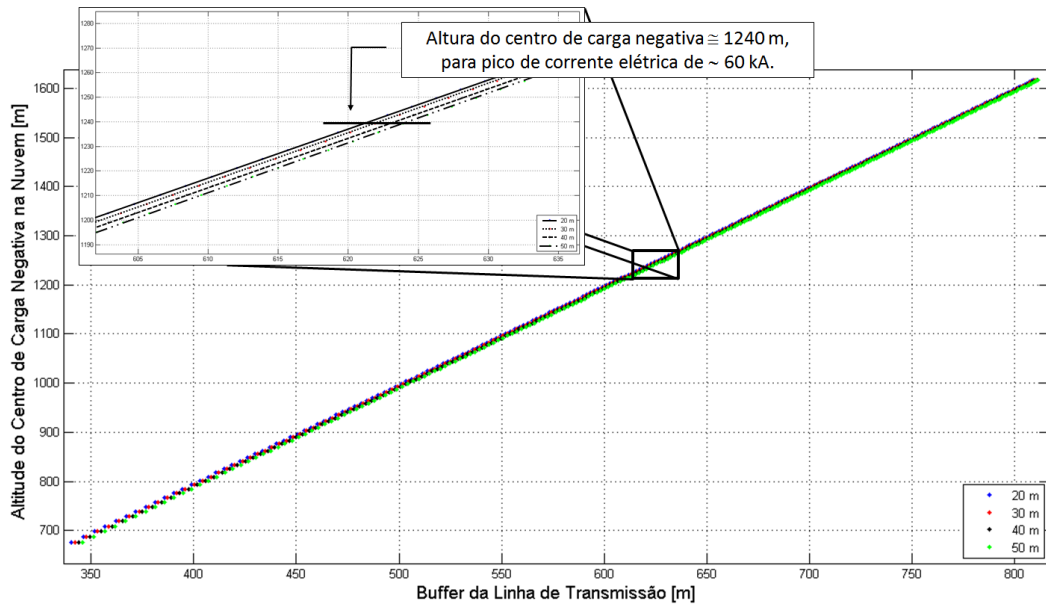


FIGURA 5 – Estimativa da altura do centro de cargas negativas na nuvem como função do *buffer* da linha de transmissão.

Com o modelo de Eriksson para o raio de atração ( $R_a = 14h_T^{0.6}$ ), calculamos os picos de corrente média das descargas atmosféricas entre 30 kA e 100 kA. Estas intensidades de corrente elétrica representam os valores médios registrados pelos sistemas de monitoramento de tempestades, sendo portanto, a partir desta interpretação do registro médio dos picos de correntes na região das torres de transmissão, que a equação 8 determina o valor do *buffer* da linha.

A FIGURA 6 mostra o resultado do *buffer* da linha de transmissão como função dos valores do pico de corrente entre 30 kA e 100 kA, ver FIGURA 6.

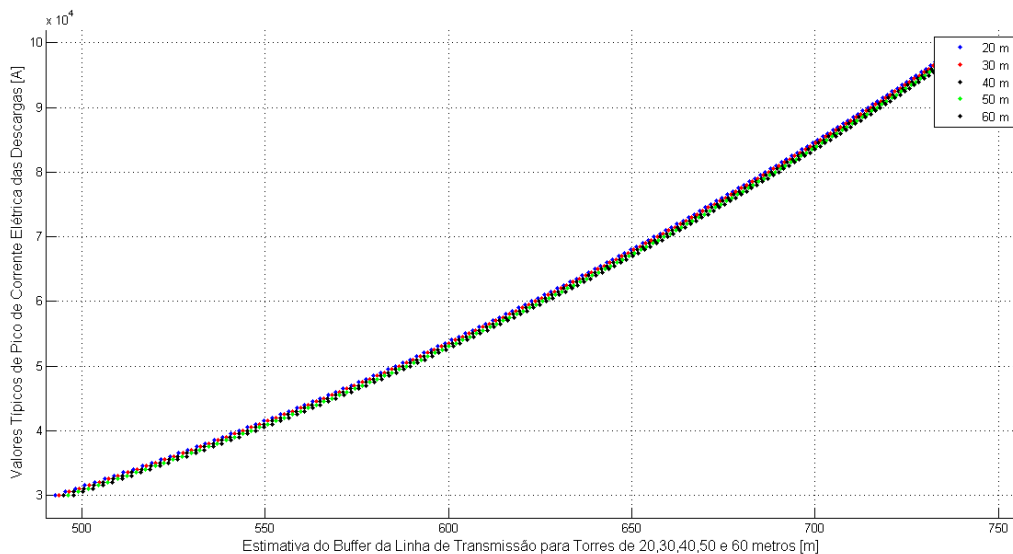


FIGURA 6 – Estimativa do *buffer* da linha segundo o modelo do raio de atração de Eriksson, para picos de corrente elétrica entre 30 kA e 100 kA.

Considerando um valor médio do pico de corrente de  $\cong 60$  kA, torres de transmissão com 20 m de altura devem considerar um *buffer* de 622 m. Torres de 30 m de altura, um *buffer* de 623 m. Um *buffer* de 624 m para torres de 40 m, *buffer* de 625 m para torres de 50 m de finalmente, um *buffer* de 627 m para torres de transmissão com 60 m de altura. A TABELA 2 mostra outros valores de *buffer* da linha, para outros registros médios de pico de corrente, ver TABELA 2.

TABELA 2 – Estimativa do *buffer* da linha de transmissão para valores de pico de corrente média da descarga atmosférica, de 30 kA, 90 kA e 100 kA.

ALTURA DA TORRE [m]	Buffer, (I) = 30kA	Buffer, (I) = 90kA	Buffer, (I) = 100kA
20	492.71	714.43	740.35
30	493.84	715.23	741.44
40	495.05	716.06	742.57
50	496.32	716.94	743.55
60	497.64	717.85	744.68

## 6.0 - CONCLUSÃO

Dada a alta taxa de densidade de raios em algumas regiões por onde estão dispostas torres de transmissão de energia elétrica, muitos desligamentos ocorrem a partir da incidência direta ou indiretamente na linha de transmissão.

Para que os modelos de previsão possam estimar as condições prováveis de incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão faz-se necessário determinar um *buffer* da linha.

Foi proposto um modelo de estimativa do centro de cargas negativas em tempestades com raios, que considera o campo elétrico de *breakdown*, pico de corrente médio das descargas na região onde estão instaladas as torres e linhas de transmissão e parâmetros eletrostáticos da atmosfera.

A partir deste modelo foi usado o conceito de raio de atração, modelado por Eriksson (1987), que permitiu determinar a distância entre o cabo para raio da estrutura até o centro de cargas negativas da tempestade.

Usando uma relação trigonométrica foi conferida ao modelo, e disto alguns ângulos de maior proximidade da tempestade até a torre de transmissão foi calculado. Com a lei dos cossenos na relação trigonométrica foi possível encontrar a distância da base da torre de transmissão até o centro de cargas negativas da tempestade.

Foi considerado uma precessão desta distância ao redor da torre de transmissão e obtido um *buffer* da linha de transmissão, como função da corrente elétrica média das descargas atmosféricas.

Os resultados numéricos mostram que o centro de carga das tempestades está entre 1200 m e 1300 m de altitude, admitindo dados do pico de corrente elétrica das descargas registradas pelos sistemas de monitoramento.

O *buffer* da linha de transmissão foi calculado para torres de 20 m, 30 m, 40 m, 50 m e 60 m de altura. Para estas alturas foi encontrado um tamanho de *buffer* que varia entre 492 m e 745 m, dependendo o valor médio do pico de corrente elétrica da descarga atmosférica que será considerado no modelo de altura do centro de cargas negativas da nuvem de tempestade.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CROWLEY, J.M. The Fair-Weather Atmosphere as a Power Source. Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics, 2011.
- (2) CHOWDHURI, P. Estimation of Flashover Rates of Overhead Power Distribution Lines by Lightning Strokes to Nearby Ground. IEEE Transaction on Power Delivery, 1989.
- (3) DELERA, L.; GARBAGNATI, E. Lightning Stroke Simulation by Means of Leader Progression Model part I: description of the model and evaluation of exposure of freestanding structures. Power Delivery, IEEE Transactions on. Volume: 5. p. 2009-2022. Italy, 1990.
- (4) EPRI. Electrical Effects of HVDC Transmission Lines - State of the science. Palo Alto, CA, 2010.
- (5) ERIKSSON, A. J. An Improved Electrogeometric Model for Transmission Lines Shielding Analysis. IEEE Transactions on Power Delivery, vol.2, n.3, p. 871-886, 1987.
- (6) IRIBARNE, J. V.; CHO, H. R. Atmospheric Physics. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 212 p. Boston, 1980.
- (7) KREHBIEL, P. R. The Electrical Structure of Thunderstorms. The Earth's Electrical Environment. Washington, DC: National Academy Press, 1986.
- (8) MACGORMAN, D.R; RUST, W. D. The Electrical Nature of Storms. Oxford University Press, 1998.
- (9) RAIZER, Y., G. MILIKH, M. SHNEIDER, AND S. NOVAKOVSKI. Long Streamer in the Upper Atmosphere Above Thundercloud, J. Phys. D Appl. Phys., 31(22), 1998.



- (10) RIZK, F. A. Modeling of Transmission Line Exposure to Direct Lightning Strikes. IEEE Transactions on Power Delivery, vol.5, n.4, p.1983-1997, 1990.
- (11) RYCROFT, M.J. Electrical Processes Coupling the Atmosphere and Ionosphere: an overview, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 68, 445-456,1996.
- (12) STOLZENBURG, M.; RUST, W. D.; SMULL, B. F.; MARSHALL T.C. Electrical Structure in Thunderstorm Convective Regions 1 - Mesoscale convective systems. Journal of geophysical research, 1998.
- (13) TONG, L.; NANBU, K.; FUKUNISHI, H. Investigation of Initiation of Gigantic Jets Connecting Thunderclouds to the Ionosphere. 12<sup>th</sup> International Congress on Plasma Physics, 25-29 October, Nice, France, 2004.
- (14) UMAN, M. A.; RAKOV, V.A. Lightning: Physics and Effects. Cambridge University Press, 2003.

#### 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Armando Heilmann – (Itaiópolis/SC, 1977), graduado (Bach. e Lic.) em Física pela UFPR (2004), mestre em Ciências Atmosféricas pelo IAG - USP, (2006) e doutor em Ciências Geodésicas na UFPR. Pós-doutorado (2012-2013) no Instituto Tecnológico SIMEPAR em Processos Eletrostáticos e Eletromagnéticos de Descargas Atmosféricas Aplicados à Meteorologia e em (2013-2014) em Eletricidade Atmosférica e Monitoramento de Campo Elétrico Quase-Estático Atmosférico Local. Professor de Física Teórica e Experimental CEM - UFPR. Colabora com os laboratórios de Geodésia Espacial e Hidrografia - LAGE/UFPR e Sistemas de Propagação de Sinais - DEL/UFPR. Como pesquisador participa de projetos P&D junto ao grupo de estudo e monitoramento de descargas atmosféricas do SIMEPAR/PR. Principais linhas de pesquisa: Eletricidade Atmosférica, Física das Tempestades, Eletrodinâmica da Atmosfera, Propagação de Ondas Eletromagnéticas no Meio Ionosférico (Ondas *Whistlers* e *Sferics*), Monitoramento de Descargas Atmosféricas (VLF, ELF, LF e VHF), Perturbações em Dinâmica Orbital.



Eduardo Alvim Leite – (Carangola/MG, 1960), graduado em Engenharia Elétrica (1982), pela (UFJF), especialização em engenharia de sistemas (1983) (UFRJ), mestre em administração estratégica (1994), pela UFPR e doutor em engenharia civil (2008), pela COPPE/UFRJ. Atuou de 1984 a 1987 como Analista de Sistemas e de Pesquisa Operacional em empresas privadas e, de 1988 a 1995, como engenheiro e gerente de planejamento e gestão tecnológica do LAC (atual LACTEC). De 1995 a 2000 exerceu o cargo de superintendente da Companhia Paranaense de Energia (COPEL), responsável pela coordenação do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) e, de 2000 a 2003, foi Diretor Superintendente do Instituto Tecnológico SIMEPAR. De 2003 a 2010 foi pesquisador nas áreas de previsão hidrometeorológica e modelos decisórios sob incerteza. Em abril de 2011 retornou ao cargo de Diretor Superintendente do Instituto Tecnológico SIMEPAR. Possui como áreas de concentração a Administração da Inovação, Sistemas de Informações Ambientais e Modelos de Tomada de Decisão sob Incertezas.