



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



A CORRENTE ELÉTRICA E O PROCESSO DE CONEXÃO DOS RAIOS COM ESTRUTURAS NO SOLO.

RELATÓRIO FINAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)

Fernando Valadares Calheiros de Siqueira (ITA)

E-mail: fernandovldrs@gmail.com

Marcelo Magalhães Fares Saba (INPE, Orientador)

E-mail: marcelo.saba@inpe.br

Julho de 2017

1. Introdução

O processo de conexão de um raio a estruturas no solo é um fenômeno ainda a ser plenamente compreendido. Por tratar-se de um evento de grande potencial destrutivo a equipamentos eletrônicos, o estudo dessas conexões possui grande aplicação ao desenvolvimento teórico de zonas de proteção geradas por estruturas atrativas de descargas elétricas (para-raios). No decorrer dos últimos 200 anos, foram postuladas diversas formas geométricas para tais zonas de proteção, variando de cones a cilindros envolvendo o para-raios, das quais muitas não possuíam qualquer embasamento experimental. O formato de zona de uma “esfera de rolamento” (Figura 1) foi inicialmente proposto por Ralph H. Lee com base em dados experimentais envolvendo linhas de transmissão [1], proposta inicialmente com raio de 150 pés (aproximadamente 47 metros). Futuramente, o método da esfera de rolamento seria relacionada ao Modelo Eletrogeométrico (EGM), com a suposição de que o raio da esfera seria equivalente à distância de colisão (*striking distance*), definida como a distância entre o líder ascendente e o líder descendente logo antes da conexão [2].

Esse projeto é dedicado ao estudo da distância de colisão e sua relação à corrente de pico no contexto de construções de altura mediana (aproximadamente 50 metros). Deve-se levar em consideração que todas as distâncias medidas, exceto quando explicitado o contrário, tratam-se de uma projeção bidimensional. Inicialmente será feita uma revisão teórica dos tópicos mais importantes que serão utilizados e, em seguida, uma descrição objetiva dos métodos utilizados para a aquisição de dados experimentais. Por fim, os dados adquiridos serão apresentados e serão utilizados na validação teórica de diferentes versões do EGM, e será apresentado um breve estudo da relação entre o comprimento 3D e a projeção 2D de um evento com base no algoritmo MEADAI de Gao et. al., 2014. [3]

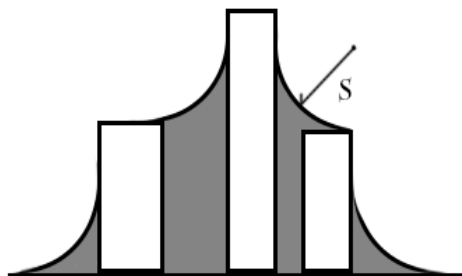


Figura 1– Segundo a proposição de uma esfera de rolamento de raio S , as áreas acinzentadas estariam na zona de proteção.

1.1 Líderes ascendentes e distância de colisão

Nesse trabalho, nos restringiremos a conexões entre a nuvem e estruturas de aproximadamente 50 metros de altura. A aproximação de um raio é dada pelo denominado *stepped leader*, que em tradução livre pode ser entendido como “líder intervalado”. Trata-se do canal condutor descendente originário da nuvem que realizará a conexão. Esta conexão, no entanto, não ocorre diretamente na estrutura, mas em um segundo canal que realiza o caminho ascendente, da estrutura à nuvem. Esse canal secundário é denominado líder ascendente conectivo (LAC, ou UCL na sigla em inglês) e está exemplificado na Figura 2. Por ser o responsável pela realização da conexão, o LAC está diretamente relacionado ao estudo da zona de proteção e do conceito de distância de colisão.



Figura 2 – Exemplos de líderes conectivos sendo originados no processo de conexão nuvem-solo.

Há duas definições utilizadas para distância de colisão. A primeira é descrita como a distância da ponta do líder descendente ao para-raios no momento em que um LAC estável é originado [4], e será denotada aqui por $S1$. Outra definição possível corresponde à mesma distância entre a ponta do líder descendente e o para-raios, mas no momento em que a conexão ocorre [5], e será denotada por $S2$. A última definição possui uma determinação experimental mais difícil, uma vez que, realizada a conexão, nem sempre é possível distinguir o LAC do líder descendente. Observações de alguns eventos realizados previamente pelo grupo ELAT do INPE [6], que também serão abordados aqui, sugerem que a distância final da conexão é percorrida pelo LAC, e essa suposição será usada para determinar a localização da ponta do líder descendente e consequentemente a distância de colisão.

1.2 Modelo Eletrogeométrico (EGM)

Como dito acima, a importância da distância de colisão está relacionada com a determinação de zonas de proteção. O EGM complementa essa relação estabelecendo uma relação entre o pico de corrente (I) de uma conexão à distância de colisão (S) através da expressão

$$S = a \cdot I^b \quad (1)$$

Além de existirem duas definições possíveis para S , existem várias proposições para os valores de a e b , dispostas na Tabela 1. A importância do EGM se dá ao fato de que é consideravelmente mais simples determinar o pico de corrente de um evento em comparação à distância de colisão, que requer uma montagem de câmeras de alta velocidade. Portanto, a partir de distribuições estatísticas de correntes de pico por raio determinadas experimentalmente [7] e do EGM, é possível calcular a distribuição estatística da distância de colisão e, por fim, calcular a zona de proteção em função do nível de proteção desejado. Um estudo mais aprofundado nesse sentido pode ser encontrado no trabalho de N. Yahaya e M. Daud, 2013 [8].

Modelo:	a	b
Armstrong and Whitehead	6.72	0.8
Brown and Whitehead	7.1	0.75
Gilman and Whitehead	6.7	0.8
	6	0.8
Love	10	0.65
Whitehead CIGRE survey	9.4	0.67
	8.5	0.67
IEEE Working Group (1)	8	0.65
IEEE Working Group (2)	10	0.6

Tabela 1 – Diferentes valores para os parâmetros do EGM. Tabela retirada de V. Cooray, *Lightning Protection* [9].

2. Materiais e métodos

Duas câmeras digitais de alta taxa de quadros por segundo, Vision Research Phantom v711 e v12, foram instaladas em um prédio localizado em São Paulo (coordenadas geográficas aproximadas: -23.483, -46.726) e direcionadas a dois edifícios denominados P1 e P2. Ambos P1 e P2 são equipados com para-raios cuja ponta está a uma altura de aproximadamente 52 metros. Também foi instalada uma câmera auxiliar comum (30 fps) em uma localização distinta, com o intuito de registrar o canal condutor do raio de outro ângulo e possibilitar uma análise tridimensional. A Figura 3, feita pela equipe, mostra o cenário do experimento.

Toda a configuração está detalhada na Figura 4, onde os pontos demarcados estão legendados com a sua localização em metros do sistema de coordenadas cartesiano determinado para o experimento. As distâncias e o próprio mapa foram obtidos de ferramentas web do Google Maps. "PR" corresponde ao ponto de referência adotado na ponta do para-raios do edifício P1, "CR" é a localização das câmeras rápidas, e "CA" demarca a localização da câmera auxiliar.

A medição de comprimentos e velocidades será feita por contagem de pixels nas imagens obtidas, utilizando a altura dos prédios P1 e P2 como referência, assim como as informações técnicas das câmeras.



Figura 3 – Localização em que é realizado o experimento.

Os dados de pico de corrente que serão utilizados foram obtidos pelo sistema de localização de raios BrasilDat. Mais detalhes sobre seu funcionamento podem ser encontrados no trabalho de Naccarato et. al., 2012 [10]. Combinando a análise de

distâncias de colisão bidimensionais a esses dados, será encontrada a versão do EGM de melhor correspondência.

O algoritmo de tridimensionalização utilizado, denominado MEADAI, foi desenvolvido por Gao et. al., 2014 [3] e implementado no *software* MATLAB [11]. Para fins de validação do algoritmo, este foi aplicado ao evento ocorrido no dia 27 de Janeiro de 2016, contemplado no trabalho de Saba et. al., 2016 [12].

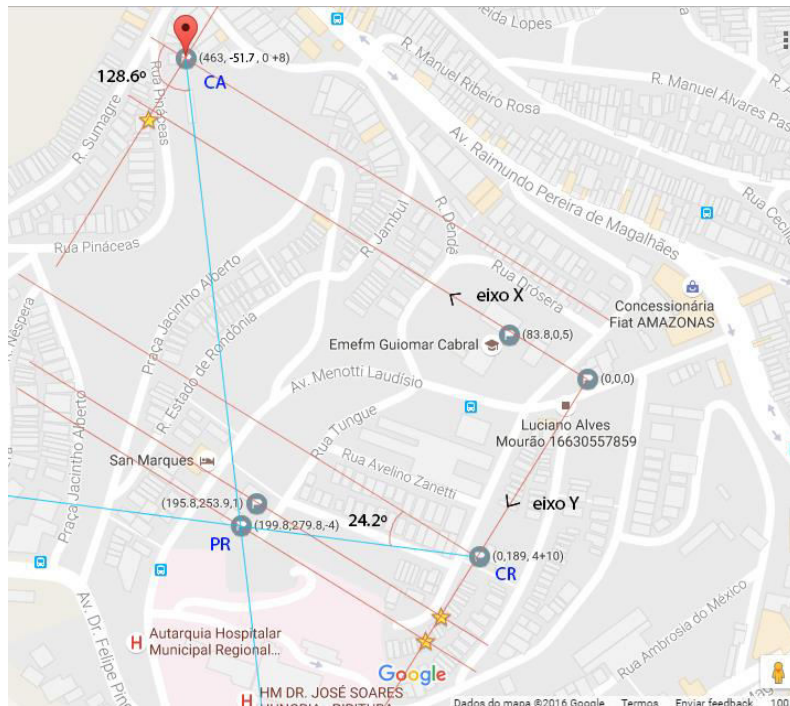


Figura 4 – Sistema de coordenadas montado para o local em que o experimento é realizado, incluindo a localização das câmeras (CA e CR) e dos prédios onde as conexões são esperadas (PR). Dados de mapa: Google, 2016.

3. Resultados obtidos

3.1 1 de Fevereiro de 2017

No evento do dia 01/02/2017 (Figura 5), foi realizada a análise da velocidade bidimensional dos canais com a câmera v711 (Figura 6) e com a câmera v12 (Figura 7). A maior taxa de quadros por segundo desta última permite a visualização de uma possível aceleração dos líderes ascendentes. As características das interpolações polinomiais realizadas nas velocidades estão dispostas na Tabela 2. O valor R^2 mede a qualidade da interpolação. Na Tabela 3, estão dispostas as distâncias de colisão bidimensionais teóricas segundo cada modelo do EGM. Na Tabela 4, encontram-se a corrente de pico do raio e as distâncias de colisão medidas.



Figura 5 – Último frame da câmera v711 antes da conexão do evento do dia 01/02/17.

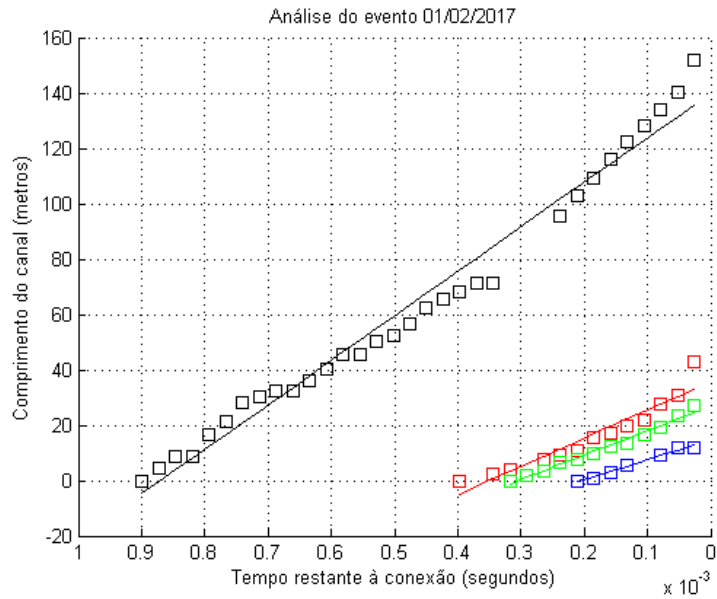


Figura 6 – Gráfico do comprimento bidimensional do canal obtido por meio da contagem de pixels da câmera v711. Em preto, o Líder descendente; em vermelho, o LAC; em verde e azul, os LANCs originados no P1 e no P2, respectivamente. O salto final não foi incluído na interpolação.

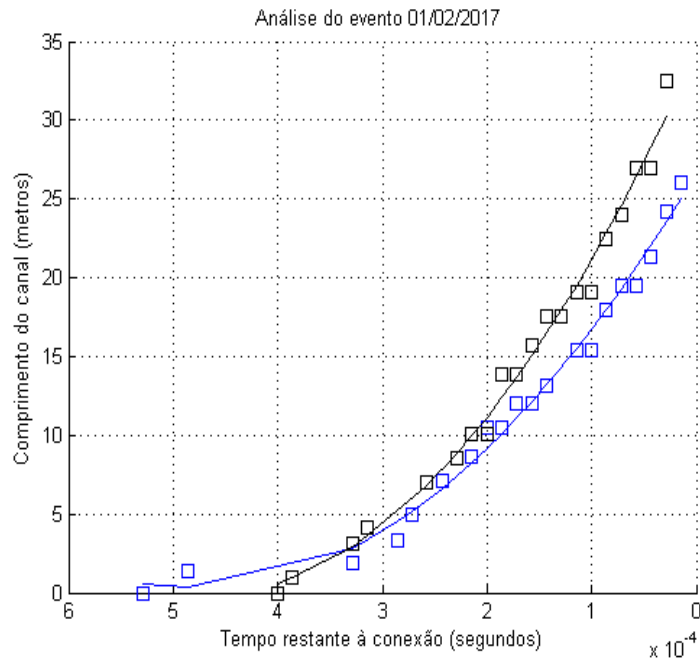


Figura 7 – Gráfico do comprimento bidimensional dos líderes ascendentes obtido por meio da contagem de pixels da câmera v12. Em preto, o LAC; em azul, o LANC originado no P1.

	Velocidade (m/s) v711	R ² v711	Aceleração (m/s ²) v12	R ² v12
Líder Descendente	1.61e+05	0.9787	-	-
LAC	1.03e+05	0.9116	1.57e+08	0.9887
LANC (P1)	8.89e+04	0.9800	1.16e+08	0.9892
LANC (P2)	7.13e+04	0.9796	-	-

Tabela 2 – Velocidades 2D medidas para cada canal e erro quadrático médio relativo R². O Líder Descendente e o LANC (P2) não foram capturados pela câmera v12, o que impediu suas análises.

Modelo:	a	b	Distância de colisão teórica
Armstrong and Whitehead	6.72	0.8	207 m
Brown and Whitehead	7.1	0.75	177 m
Gilman and Whitehead	6.7	0.8	207 m
Gilman and Whitehead – Design of new lines	6	0.8	185 m
Love	10	0.65	162 m
Whitehead CIGRE survey	9.4	0.67	166 m
Lines	8.5	0.67	150 m
IEEE Working Group (1)	8	0.65	130 m
IEEE Working Group (2)	10	0.65	162 m

Tabela 3– Parâmetros *a* e *b* segundo cada modelo do EGM, e sua distância de colisão teórica assumindo a corrente de pico medida.

Corrente de pico	73 kA
S1	137 m
S2	67 m

Tabela 4 – Distâncias de colisão medidas pela contagem de pixels da câmera v711 e a corrente de pico estimada pelo sistema de localização de raios.

3.2 24 de Fevereiro de 2016

O evento 24/02/2016 não terminou em uma conexão com os edifícios P1 ou P2, mas originou LANCs em seus para-raios. A Figura 9 apresenta o gráfico do comprimento de cada canal em função do tempo, e a Tabela 5 apresenta os valores de velocidade e R^2 .

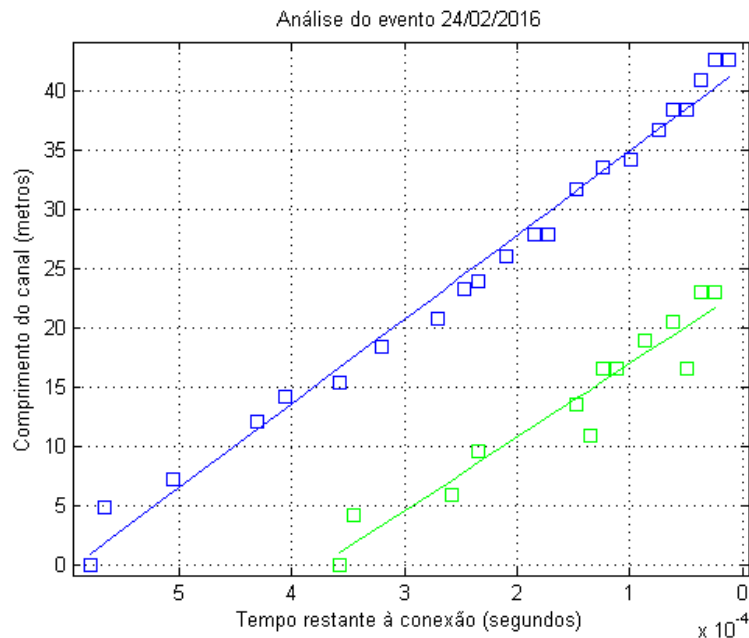


Figura 9 – Comprimento de cada canal em função do tempo. Em azul e em verde, estão representados respectivamente o LANC P2 e o LANC P1.

	Velocidade (m/s)	R ²
LANC (P1)	6.20e+04	0.9261
LANC (P2)	7.09e+04	0.9882

Tabela 5 – Velocidades 2D medidas para cada canal, acompanhadas do erro quadrático médio relativo R². O Líder Descendente e o LANC (P2) não foram capturados completamente pela câmera v12, o que impediu suas análises.

3.3 25 de Fevereiro de 2015

Esse evento (assim como os eventos que serão contemplados nos pontos 3.4 e 3.5) já foi analisado em campanhas anteriores no que tange à distância de colisão. Aqui será feita uma reprodução desses resultados, assim como uma análise complementar da velocidade de cada canal. A Figura 10 apresenta o comprimento de cada canal condutor em função do tempo. Na Tabela 6, estão dispostas as distâncias de colisão bidimensionais teóricas segundo cada modelo do EGM. Na Tabela 7, encontram-se a corrente de pico do raio e as distâncias de colisão medidas.

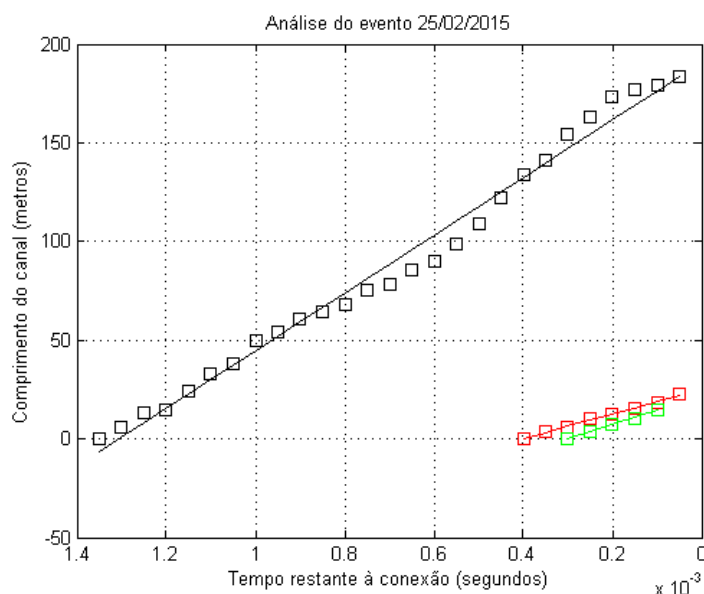


Figura 10– Comprimento de cada canal em função do tempo. Em preto, em vermelho e verde estão representados respectivamente o líder descendente, o LAC e o LANC P2.

	Velocidade (m/s)	R ²
Líder Descendente	1.46e+05	0.9869
LAC	6.21e+04	0.9963
LANC (P2)	7.14e+04	0.9949

Tabela 5 – Velocidades 2D medidas para cada canal, acompanhadas do erro quadrático médio relativo R².

Modelo:	a	b	Distância de colisão teórica
Armstrong and Whitehead	6.72	0.8	64 m
Brown and Whitehead	7.1	0.75	59 m
Gilman and Whitehead	6.7	0.8	64 m
Gilman and Whitehead – Design of new lines	6	0.8	57 m
Love	10	0.65	63 m
Whitehead CIGRE survey	9.4	0.67	62 m
Lines	8.5	0.67	56 m
IEEE Working Group (1)	8	0.65	50 m
IEEE Working Group (2)	10	0.65	63 m

Tabela 6 – Parâmetros *a* e *b* segundo cada modelo do EGM, e sua distância de colisão teórica assumindo a corrente de pico medida.

Corrente de pico	17 kA
S1	81 m
S2	44 m

Tabela 7 – Distâncias de colisão medidas pela contagem de pixels e a corrente de pico estimada pelo sistema de localização de raios.

3.4 9 de Fevereiro de 2014

A Figura 11 apresenta o comprimento de cada canal condutor em função do tempo. Na Tabela 9, estão dispostas as distâncias de colisão bidimensionais teóricas segundo cada modelo do EGM. Na Tabela 10, encontram-se a corrente de pico do raio e as distâncias de colisão medidas.

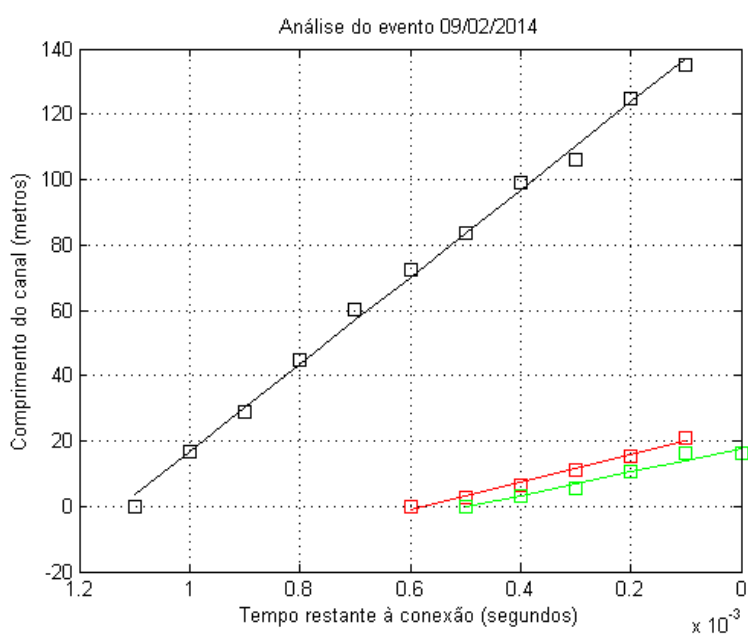


Figura 11 – Comprimento de cada canal em função do tempo. Em preto, em vermelho e verde estão representados respectivamente o líder descendente, o LAC e o LANC.

	Velocidade (m/s)	R ²
Líder Descendente	1.34e+05	0.9969
LAC	4.25e+04	0.9866
LANC (P2)	3.56e+04	0.9648

Tabela 8 – Velocidades 2D medidas para cada canal, acompanhadas do erro quadrático médio relativo R².

Modelo:	a	b	Distância de colisão teórica
Armstrong and Whitehead	6.72	0.8	55 m
Brown and Whitehead	7.1	0.75	51 m
Gilman and Whitehead	6.7	0.8	55 m
Gilman and Whitehead – Design of new lines	6	0.8	49 m
Love	10	0.65	55 m
Whitehead CIGRE survey	9.4	0.67	55 m
Lines	8.5	0.67	49 m
IEEE Working Group (1)	8	0.65	44 m
IEEE Working Group (2)	10	0.65	55 m

Tabela 9 – Parâmetros *a* e *b* segundo cada modelo do EGM, e sua distância de colisão teórica assumindo a corrente de pico medida.

Corrente de pico	14 kA
S1	62 m
S2	35 m

Tabela 10 – Distâncias de colisão medidas pela contagem de pixels e a corrente de pico estimada pelo sistema de localização de raios.

3.5 1 de Março de 2014

A Figura 12 apresenta o comprimento de cada canal condutor em função do tempo. Na Tabela 12, estão dispostas as distâncias de colisão bidimensionais teóricas segundo cada modelo do EGM. Na Tabela 13, encontram-se a corrente de pico do raio e as distâncias de colisão medidas.

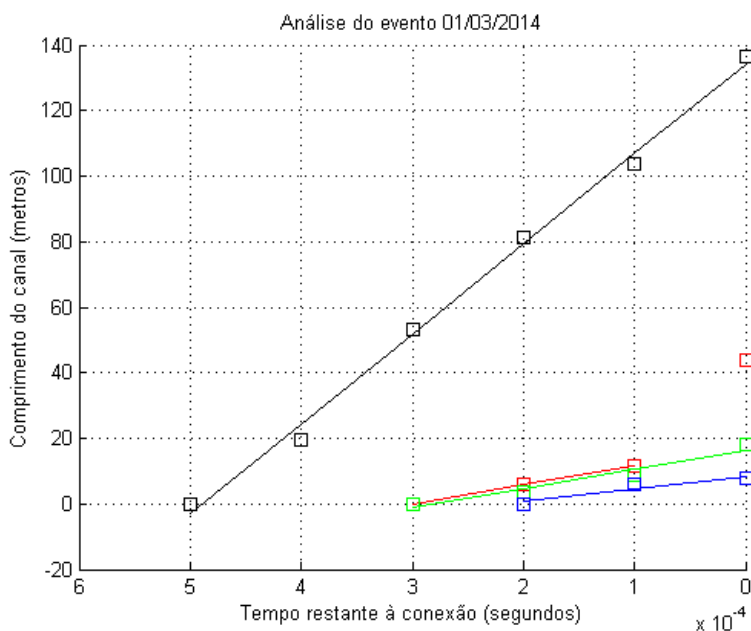


Figura 12 – Comprimento de cada canal em função do tempo. Em preto, em vermelho, verde e azul estão representados respectivamente o líder descendente, o LAC, o LANC P1 e o LANC P2.

	Velocidade (m/s)	R ²
Líder Descendente	2.75e+05	0.9962
LAC	5.71e+04	0.9999
LANC (P1)	5.89e+04	0.9529
LANC (P2)	3.89e+04	0.9261

Tabela 11 – Velocidades 2D medidas para cada canal, acompanhadas do erro quadrático médio relativo R².

Modelo:	a	b	Distância de colisão teórica
Armstrong and Whitehead	6.72	0.8	76 m
Brown and Whitehead	7.1	0.75	69 m
Gilman and Whitehead	6.7	0.8	76 m
Gilman and Whitehead – Design of new lines	6	0.8	68 m
Love	10	0.65	72 m
Whitehead CIGRE survey	9.4	0.67	72 m
Lines	8.5	0.67	65 m
IEEE Working Group (1)	8	0.65	57 m
IEEE Working Group (2)	10	0.65	72 m

Tabela 12 – Parâmetros *a* e *b* segundo cada modelo do EGM, e sua distância de colisão teórica assumindo a corrente de pico medida.

Corrente de pico	21 kA
S1	120 m
S2	46 m

Tabela 13 – Distâncias de colisão medidas pela contagem de pixels e a corrente de pico estimada pelo sistema de localização de raios.

3.6 27 de Janeiro de 2016

Esse evento não foi registrado por uma câmera de alta velocidade. No entanto, foi possível capturá-lo de dois ângulos diferentes (Figura 12), por duas câmeras localizadas nos pontos CR e CA destacados no mapa da Figura 4. Utilizando o algoritmo MEADAI, torna-se possível a reconstrução tridimensional do canal (Figura 13).



Figura 12 – Evento do dia 27/01/2016 registrado das localizações CR (esquerda) e CA (direita).

É possível utilizar esse evento para extrair relação entre o comprimento real e a sua projeção bidimensional. Seja S o comprimento em 3D, e L o comprimento 2D. Teremos a relação:

$$S = \int dl \frac{ds}{dl} \quad (2)$$

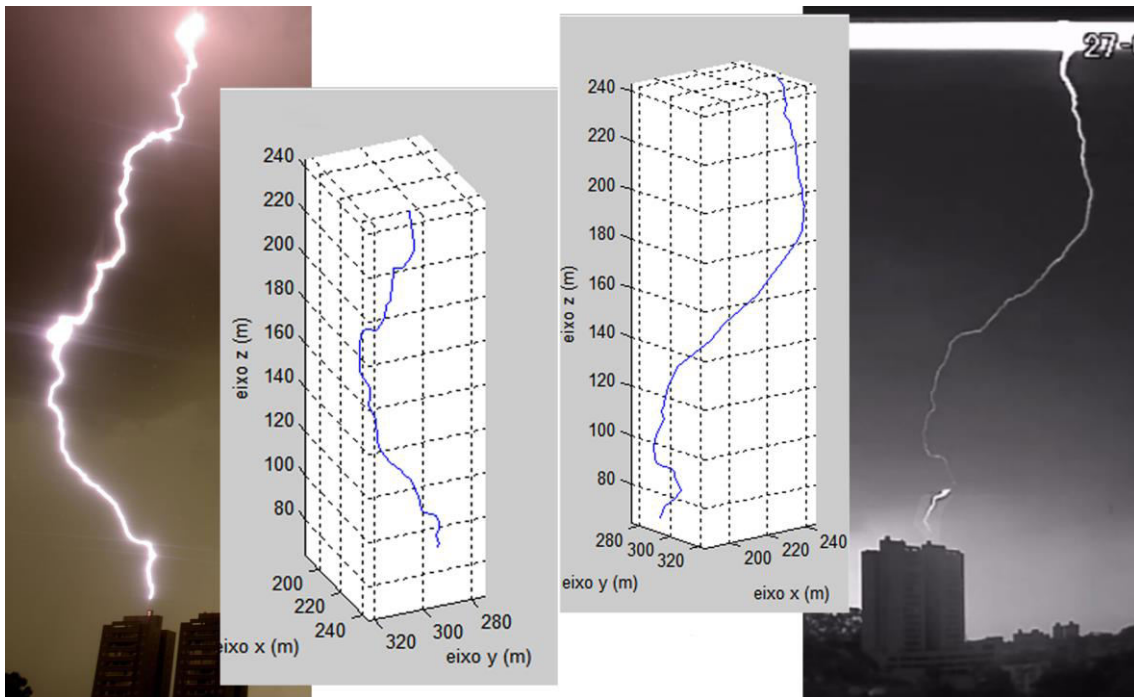


Figura 13 – Resultado da reconstrução tridimensional. Os valores dos eixos são compatíveis com o sistema de coordenadas da Figura 4.

Foi definido um comprimento dl suficientemente pequeno, e então foi encontrado o comprimento ds correspondente a ele. Realizando esse procedimento para todo o canal condutor e recolhendo a razão entre esses valores ds/dl , encontramos o valor médio de 1.8 e temos como resultado a distribuição do histograma da Figura 15. Como a obtenção de imagens adequadas à tridimensionalização depende do funcionamento correto de duas câmeras (aumentando significativamente as chances de falha), o estudo do valor ds/dl continua importante para entender a validade das medidas bidimensionais.

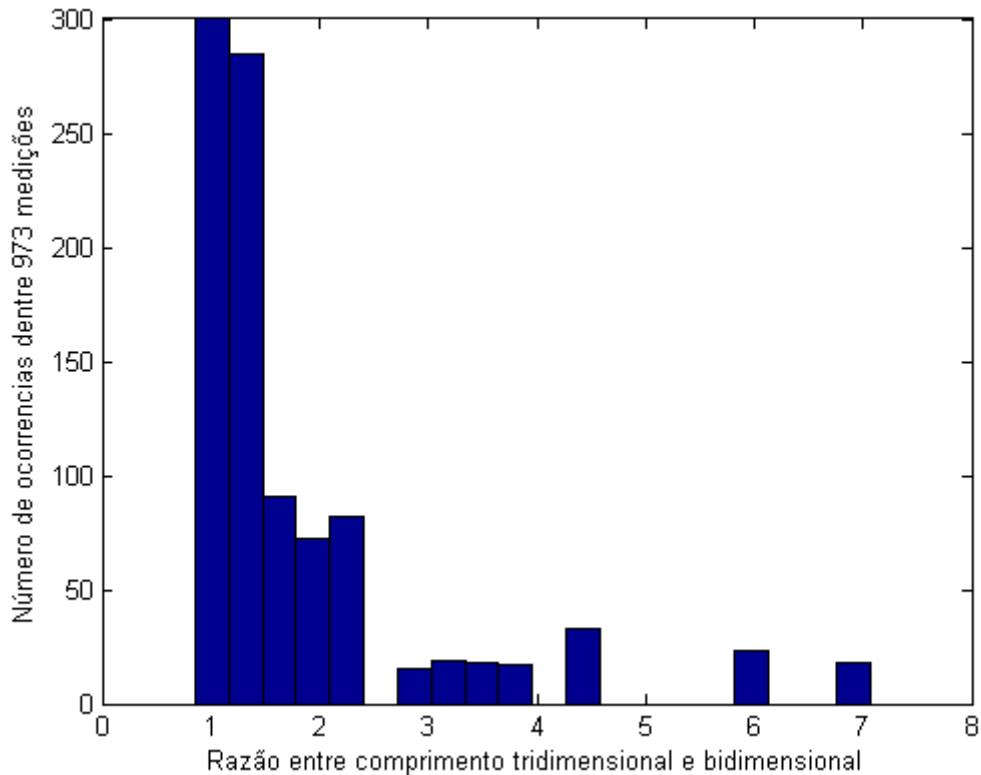


Figura 15 – Valores encontrados para a razão ds/dl .

4. Conclusão

Por ora, não há eventos o suficiente para eleger um modelo EGM como mais adequado. No entanto, dentre os modelos apresentados, o “Whitehead CIGRE survey” e o “IEEE Working Group (2)” são os que geram o menor erro quadrático médio em relação ao valor medido de $S1$, enquanto o “IEEE Working Group (1)” possui menor erro quadrático médio em relação a $S2$. Os gráficos de distância de colisão por corrente de pico das Figuras 16 e 17 apresentam os traçados de cada modelo com seus respectivos resultados experimentais. As médias das velocidades calculadas para líderes descendentes, LACs e LANCs são respectivamente $1.79e+05$ m/s, $6.62e+04$ m/s e $6.22e+04$ m/s, valores coerentes com resultados encontrados em trabalhos prévios.

Projeta-se uma melhor capacidade de análise em futuros trabalhos. Com o acúmulo de eventos, será possível um trabalho estatístico mais acurado, enquanto a possibilidade de medir os comprimentos reais através do algoritmo MEADAI

proporcionará um erro menor na determinação das distâncias de colisão e velocidades.

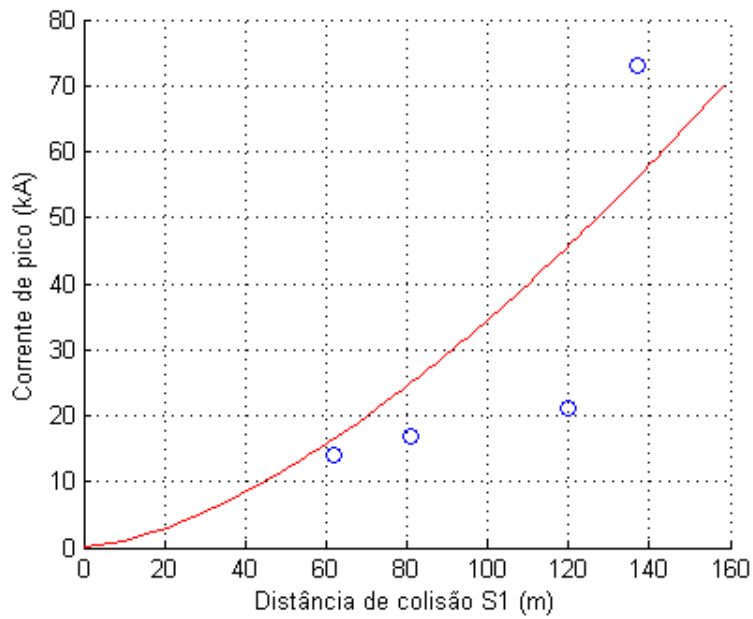


Figura 16 – Valores medidos de S1 (em azul), em comparação ao plot da função EGM de parâmetros $a=10$ e $b=0.65$ (vermelho).

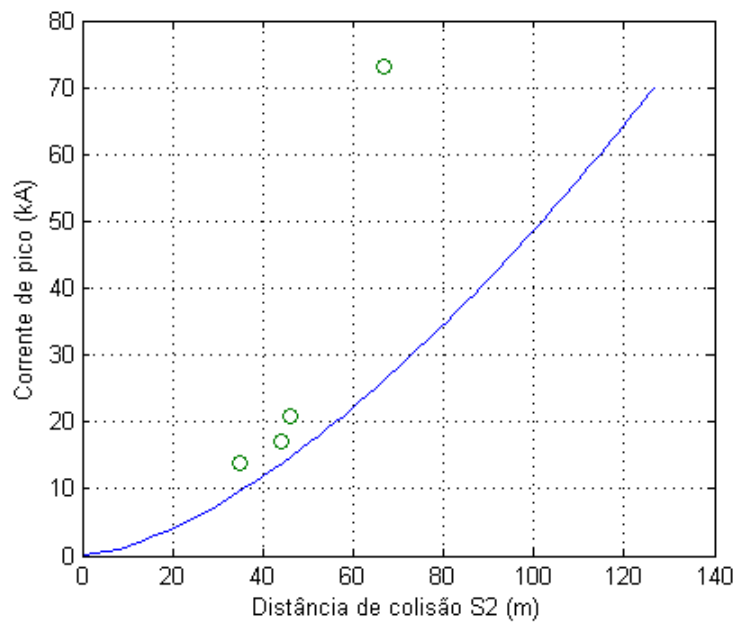


Figura 17 – Valores medidos de S2 (em verde), em comparação ao plot da função EGM de parâmetros $a=8$ e $b=0.65$ (vermelho).

Referências bibliográficas

- [1] Lee, R. (1978). Protection Zone for Buildings Against Lightning Strokes Using Transmission Line Protection Practice. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-14(6), pp.465-469, doi: 10.1109/TIA.1978.4503576.
- [2] A. Rakov, V. (2012). Lightning Discharge and Fundamentals of Lightning Protection. *Journal of Lightning Research*, 4(1), pp.3-11.
- [3] Gao, Y., Lu, W., Ma, Y., Chen, L., Zhang, Y., Yan, X. and Zhang, Y. (2014). Three-dimensional propagation characteristics of the upward connecting leaders in six negative tall-object flashes in Guangzhou. *Atmospheric Research*, 149, pp.193-203.
- [4] Golde, R. H. (1973), Lightning protection. Edward Arnold, London.
- [5] Cooray, V., U. Kumar, F. Rachidi, and C. A. Nucci (2014). On the possible variation of the lightning striking distance as assumed in the IEC lightning protection standard as a function of structure height. *Electric Power Systems Research*, 113, 79-87, doi:10.1016/j.espr.2014.03.017.
- [6] Saba, M. M. F., A. R. Paiva, C. Schumann, M. A. S. Ferro, K. P. Naccarato, J. C. O. Silva, F. V. C. Siqueira, and D. M. Custódio (2017), Lightning attachment process to common buildings, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 4368–4375, doi: 10.1002/2017GL072796.
- [7] K. Berger, R. B. Anderson, and H. Kroninger. Parameters of lightning flashes. *Electra*, vol. 41, pp. 23–37, 1975.
- [8] Yahaya, N. and Daud, M. (2013). Study of Lightning Safety Distance Using Rolling Sphere Method. *Energy and Power Engineering*, 05(03), pp.266-273, doi: 10.4236/epe.2013.53026.
- [9] Cooray, V. (2010). *Lightning protection*. London: Institution of Electrical Engineers.
- [10] K. P. Naccarato, A. C. Saraiva, M. M. F. Saba, C. Schumann and O. Pinto Jr. First performance analysis of BrasilDAT total lightning network in southeastern Brazil. In International Conference On Grounding And Earthing (GROUND), Bonito, Brazil, 2012.
- [11] MATLAB and Statistics Toolbox Release 2012b, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.
- [12] Saba, M. M. F., A. R. Paiva, C. Schumann, M. A. S. Ferro, K. P. Naccarato, J. C. O. Silva. Lightning attachment process to common buildings. In *24th International Lightning Detection Conference and 6th International Lightning Meteorology Conference*, San Diego, USA, 2016.