



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 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 2018

## 1. Introdução

Os modelos teóricos atuais para a conexão de raios a estruturas no solo ainda não foram devidamente validados por procedimentos experimentais, o que resulta em um esforço para se registrar tais eventos e, com esse objetivo, analisar criteriosamente sua ocorrência. Isso traduz-se em calcular o comprimento dos canais condutores dos raios, a presença de líderes ascendentes, a distância de colisão entre os líderes conectantes, a corrente que percorre o raio, entre outros parâmetros. Tal estudo encontra sua relevância quando é necessário proteger equipamentos sensíveis a descargas atmosféricas, onde um modelo teórico preciso permite um compromisso consciente entre custo e risco.

A análise do processo de conexão é intrinsecamente relacionada com o estudo dos líderes ascendentes conectivos (LACs) e não-conectivos (LANCs). A Figura 1 exemplifica a presença de líderes ascendentes na descarga atmosférica.

Este trabalho é a continuação de um projeto em que tais parâmetros foram coletados e comparados com as formulações teóricas mais utilizadas. Além disso, no período anterior, foi implementado em *MATLAB* o algoritmo tridimensionalizador de raios (daqui em diante denominado ATR) com base no algoritmo MEADAI (Gao, 2014), com o objetivo de aprimorar as análises. O objetivo inicial do trabalho será continuado, e em paralelo serão desenvolvidas novas ferramentas para tornar a análise de dados experimentais ainda mais confiável e automatizada.



Figura 1 - Exemplos de líderes conectivos sendo originados no processo de conexão nuvem-solo. Imagens como estas são utilizadas para entender a atratividade de estruturas a líderes descendentes.

## 2- Materiais e métodos

### 2.1 - Configuração experimental

Para realização do experimento de captura e tridimensionalização, é necessário que sejam construídos ao menos dois pontos de observação. A montagem experimental utilizada pelo grupo para a captura dos eventos consiste em duas câmeras: uma câmera *Vision Research Phantom V711* de alta taxa de quadros por segundo (*fps*) instalada na coordenada (-23.483672, -46.725695) e uma câmera *Nikon D800* instalada na coordenada (-23.479605, -46.728312). As câmeras foram direcionadas para os edifícios cujas coordenadas aproximadas são descritas a tabela 1, e cujos para-raios serão considerados nesse trabalho.

Para o procedimento de tridimensionalização ser possível, um sistema de coordenadas foi construído. A tabela 1 também inclui, para cada coordenada geográfica, a coordenada do sistema construído para o experimento. As coordenadas dos para-raios de P1, P2 e P3 foram obtidas pelo algoritmo de tridimensionalização, descrito na seção 2.3.1.

	Coordenadas geográficas	Coordenadas do experimento (em metros)
<b>P1</b>	(-23.483424, -46.727823)	(199.8, 279.8, 48.0)
<b>P2</b>	(-23.483245, -46.727676)	(198.5 253.9 53.0)
<b>P3</b>	(-23.483632, -46.726623)	(102.2, 252.2, 55.4)
Ponto de	(-23.483672,	(0.0, 189.0, 16.0)

observação da câmera rápida	-46.725695)	
Ponto de observação auxiliar	(-23.479605, -46.728312)	(463.0, -51.7, 7.2 )

Tabela 1: Identificação e localização aproximada dos edifícios considerados no experimento

## 2.2 - Algoritmo de processamento de imagem

Para uma efetiva tridimensionalização através do ATR, é necessário que uma quantidade grande de pixels das imagens de cada câmera sejam armazenados em um arquivo de texto para processamento em MATLAB. Foi desenvolvido um algoritmo auxiliar que, ao receber uma imagem que retrata um raio, identifica o seu contorno e retorna o máximo número de pixels da linha guia média que o percorre, diminuindo consideravelmente o tempo necessário para sua análise.

O algoritmo possui uma grande versatilidade no formato do canal luminoso retratado na imagem, apesar de algumas exceções serem conhecidas. A Figura 2 retrata uma figura artificial de um raio e o resultado da aplicação do algoritmo, com o objetivo de demonstrar a diversidade de aplicações.

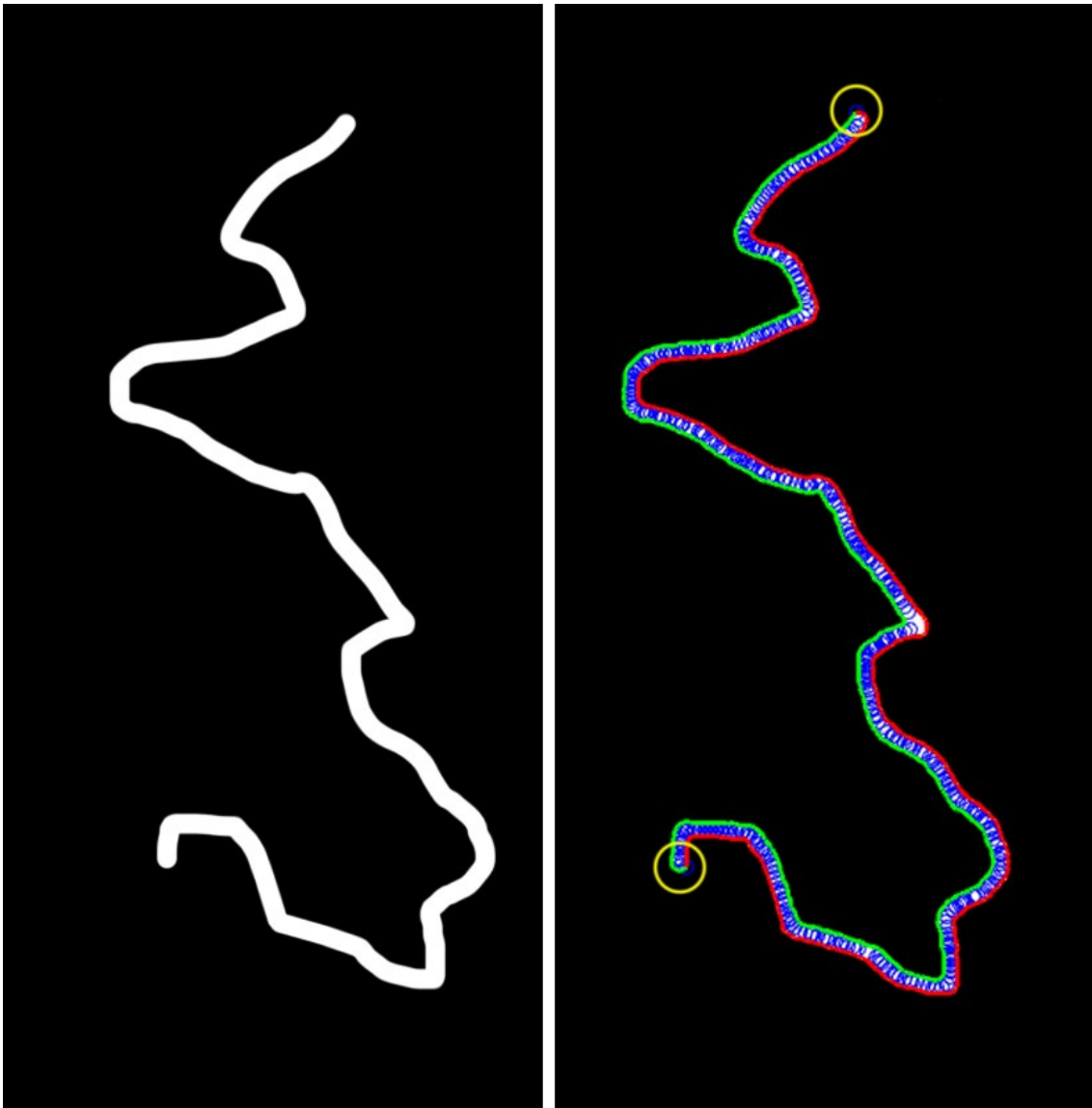


Figura 2: Resultado comparativo do algoritmo de processamento de imagens para um canal condutor fictício.

Três elementos são destacados nessa imagem e podem ser utilizados para entender o resultado do algoritmo:

- Os círculos amarelos destacam os extremidades do canal. A extremidade inferior é o local do impacto, caso esse esteja retratado na imagem;
- Os contornos verde e vermelho são, respectivamente, as divisões da esquerda e da direita do contorno, seccionado pelas extremidades;
- Os círculos de cor azul no interior do canal são os pontos da linha-guia obtidos, e são retornados pelo algoritmo.

Com base nesses elementos, é possível descrever o procedimento utilizado para obtê-los:

### 2.2.1 - Obtenção das extremidades do canal

O pré-processamento e a obtenção dos pontos do contorno da imagem são realizados utilizando funções nativas do *MATLAB*. Para encontrar as extremidades desse contorno, no entanto, é necessária uma análise mais profunda sobre uma função de “curvatura” dada por:

$$dir = \frac{\langle d_1, d_0 \rangle}{|d_1||d_0|} \quad (1)$$

Onde:

- $d_1$  é o vetor entre dois pontos adjacentes do contorno,  $N+1$  e  $N$ ;
- $d_0$  é o vetor entre o ponto  $N$  e o ponto  $N_0$ . O ponto  $N_0$  é sempre escolhido como o ponto mais inferior da imagem, constante em todo o cálculo.

Essa função de curvatura, por ser calculada sobre um contorno fechado, é necessariamente periódica. Considerando o formato usual do canal condutor de um raio (extremidades acentuadas e espessura relativamente pequena), as suas extremidades podem ser caracterizadas pelo cruzamento do zero da função *dir* e possuem uma periodicidade bem definida de dois cruzamentos por volta no contorno. Portanto, as extremidades podem ser definidas no ponto de cruzamento do zero do harmônico fundamental da função *dir*. A Figura 3 demonstra tanto a função de curvatura quanto o seu harmônico fundamental, correspondendo ao caso analisado na Figura 2. Apesar das tortuosidades e a discretização dos pixels gerarem um ruído considerável na função, foi possível filtrar esse ruído e encontrar os pontos desejados.

Após a obtenção da extremidade, com o contorno já obtido, seccioná-lo é uma tarefa trivial.

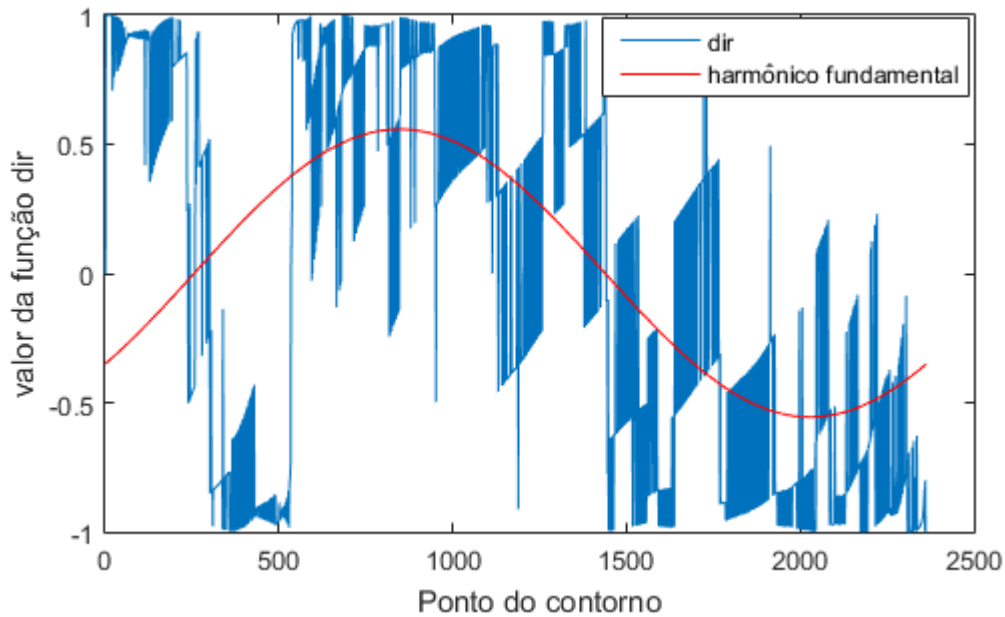


Figura 3: função de curvatura e harmônico fundamental para cada ponto do contorno para o canal representado na Figura 2. É notável que a função filtrada cruza o valor zero duas vezes, cada vez correspondente a uma extremidade.

### 2.2.2 - Obtenção da linha-guia

Uma vez obtidas as secções do contorno, é possível obter a linha-guia entre ambas, a partir do seguinte algoritmo:

*escolhe-se uma das secções do contorno  
 enquanto  $n$  menor que o comprimento da secção:  
   traçar reta entre os pontos  $n$  e  $n+h$   
   rotacionar a reta em 90 graus para obter a reta normal  
   encontrar a interseção entre a reta normal e a segunda  
   secção do contorno  
   coleta ponto médio entre os pontos de cada secção  
 $n = n+h$*

Uma complexidade maior de algoritmo foi necessária para evitar anomalias e retornar os pontos da linha-guia em ordem.

Uma vez obtidos os pontos da linha-guia (destacados em azul na Figura 2), estes são coletados para uso na tridimensionalização, finalizando o objetivo desse algoritmo.

## 2.3 - Algoritmo de tridimensionalização

O algoritmo utilizado para tridimensionalização do canal condutor utilizando duas imagens obtidas de pontos de observação distintos foi construído com base no método denominado MEADAI desenvolvido por Gao et. al. (2014), e aprimorado de forma a atingir o máximo de automação possível. No entanto, algumas decisões heurísticas precisam ser tomadas com a finalidade de evitar anomalias. O programa foi escrito como três funções que interagem entre si, descritas a seguir.

### 2.3.1 - *pmatch.m*

Essa função deve receber as seguintes informações de entrada:

- *Pixels* da câmera rápida (CR) e câmera auxiliar (CA) para os quais a correspondência será avaliada
- *Pixels* onde se encontra o ponto de referência (PR) e o centro da imagem para cada câmera. O ponto de referência utilizado nesse caso foi o para-raios P1.
- Informações de cada câmera como localização no sistema de coordenadas do experimento, orientação angular do eixo óptico, tamanho de um *pixel* no sensor e distância focal da lente.

E apresenta as seguintes informações de saída:

- Localização ( $x, y, z$ ) em metros no sistema de coordenadas do experimento para o ponto observado suponto que ambos os *pixels* selecionados na entrada correspondem ao mesmo ponto no espaço tridimensional.
- Medida de correspondência  $db$ . Quanto menor o valor  $db$ , mais provável é que ambos os *pixels* da entrada correspondam ao mesmo ponto no espaço tridimensional.

O programa trata-se de uma implementação do método MEADAI. O trabalho original (Gao et. al, 2014) deve ser consultado para mais detalhes sobre as expressões matemáticas utilizadas e as considerações feitas.

Essa função pode ser utilizada para qualquer par de pontos nas imagens capturadas. Portanto, pôde ser aplicada para obter a



localização dos para-raios P1, P2 e P3, informação disponível na Tabela 1.

### 2.3.2 - *findcorresp.m*

Em recapitulação, o objetivo final do método é, dada duas sequências de *pixels* (ENTR e ENTA) respectivas a câmera representando a imagem de um canal luminoso, retornar uma sequência de pontos  $(x, y, z)$  que correspondem ao canal luminoso tridimensionalizado. Aplica-se a função *pmatch.m* para cada possível par, gerando uma matriz de valores *db*.

A Figura 4 exemplifica, para o evento que será discutido nesse trabalho, a matriz completa para a raiz quarta de cada *db*, a fim de acentuar a localização dos pontos de mínimo. É notável a presença de um percurso de valores mínimos de *db*, ou seja, os pares de pontos de maior correspondência. Esses pares devem ser recuperados, e suas localizações geográficas, coletadas.

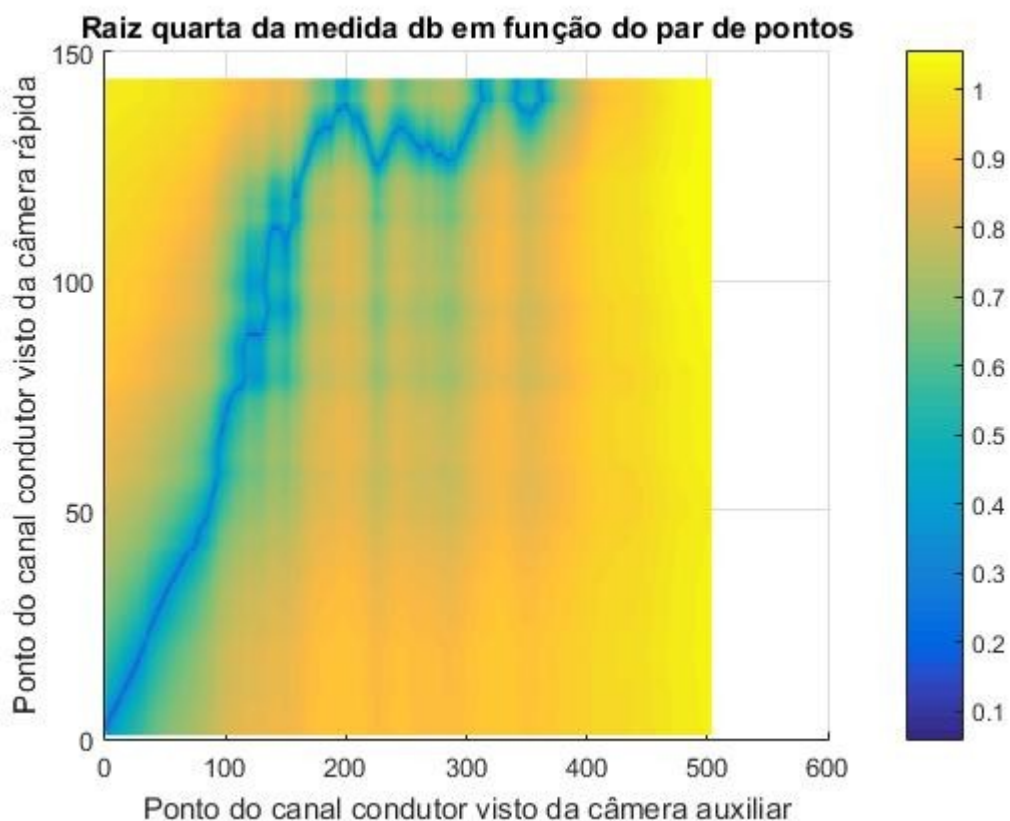


Figura 4: exemplo de matriz de valores db para o evento analisado na seção 3. O caminho de valor mínimo corresponde ao percurso físico do canal luminoso.

Esta função simplesmente coleta, para cada ponto da câmera auxiliar, o ponto da câmera auxiliar de maior correspondência. Essa técnica, no entanto, gera alguns problemas, tais quais:

- Ruídos e aproximações nas informações de entrada podem deslocar o ponto de mínimo para alguns pixels. Isso causa uma distorção indesejada no canal, que deve ser corrigida manualmente.
- Alguns pontos da câmera auxiliar podem possuir correspondência com mais de um ponto da câmera rápida, o que é desconsiderado no presente desenvolvimento.
- Para esse caso em específico, observou-se que os pontos além do ponto 200 da câmera auxiliar não retornam significado físico, e foram retirados manualmente da análise.

Novos métodos deverão ser desenvolvidos em trabalhos futuros, com a finalidade de minimizar esses problemas.

### **2.3.3 - atr.m**

Este é o *script* principal, o qual é utilizado pelo usuário para a tridimensionalização. Ele aplica a função *pmatch.m* para ambas as sequências ENTR e ENTA, coletando uma matriz de posições e uma matriz de correspondência. Utilizando a função *findcorresp.m* para analisar a matriz de correspondência, define a sequência de posições ocupadas pelo canal luminoso. Essa informação, relacionada com o instante em que cada frame e cada ponto é capturado pela câmera rápida, é utilizada para calcular o percurso do raio em função do tempo, finalizando a tridimensionalização.

## **3 - Evento capturado e aplicação dos métodos desenvolvidos.**

No dia 20/03/2018 um evento foi capturado em vídeo pelas câmeras de ambas estações, permitindo a análise temporal e tridimensional. Esse evento, no entanto, não atingiu nenhum dos edifícios presentes, terminando em um poste localizado na

coordenada geográfica (-23.482860, -46.726897). Apenas um LANC foi observado, emitido do para-raios identificado por P3.

A figura 5 apresenta ambas as imagens capturadas pelas câmeras. Pode-se notar a interferência na imagem da câmera rápida (à esquerda) causada por uma gota d'água, e esse problema foi contornado utilizando uma reta nos pontos em que a imagem não é confiável. O algoritmo de processamento de imagens funcionou como previsto, retornando os pontos a serem utilizados na tridimensionalização.

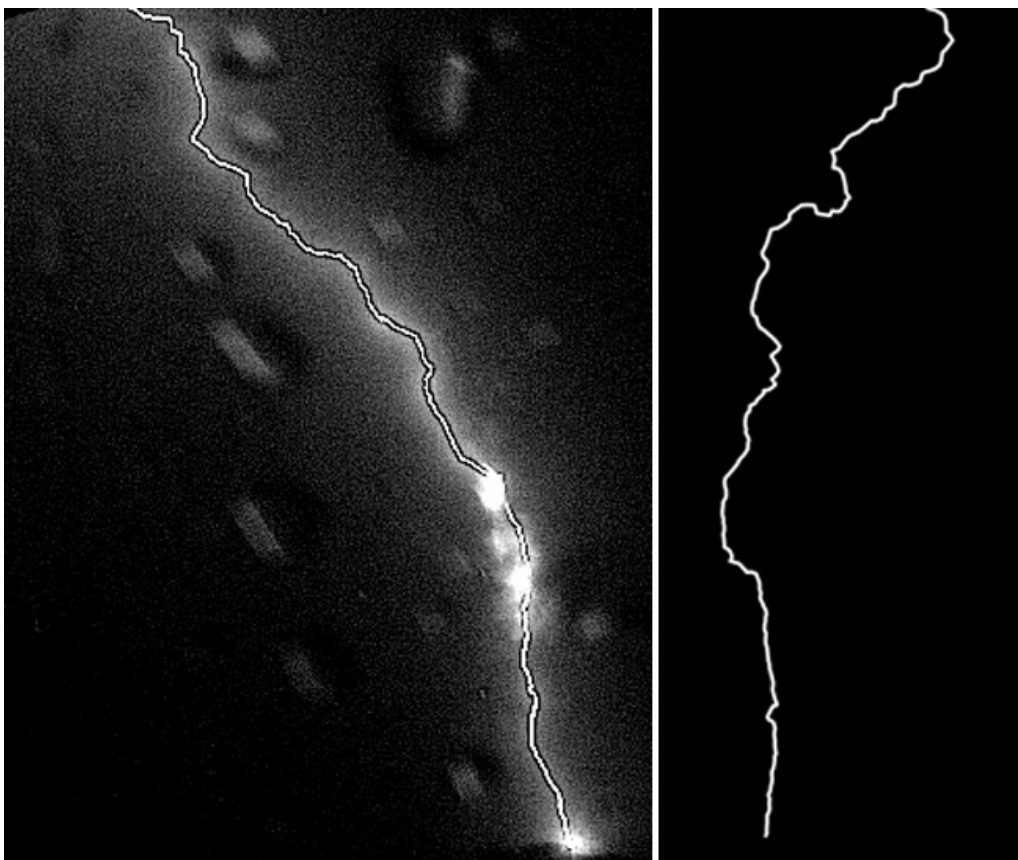


Figura 5: canal luminoso visto pela câmera rápida (esquerda) e pela câmera auxiliar (direita), já editadas para o uso adequado do programa de processamento de imagens.

Com a utilização do algoritmo de tridimensionalização, a análise geométrica e temporal do raio é apresentada na figura 6. São destacadas as localizações de cada um dos para-raios considerados, e a distância em metros para cada um em função do tempo foi calculada e está mostrada na figura 7. É possível observar que o

canal se encontra consideravelmente mais próximo dos para-raios de P3 do que de P1 e P2, o que justifica o aparecimento do LANC apenas no primeiro.

### Representação tridimensional dos pontos adquiridos

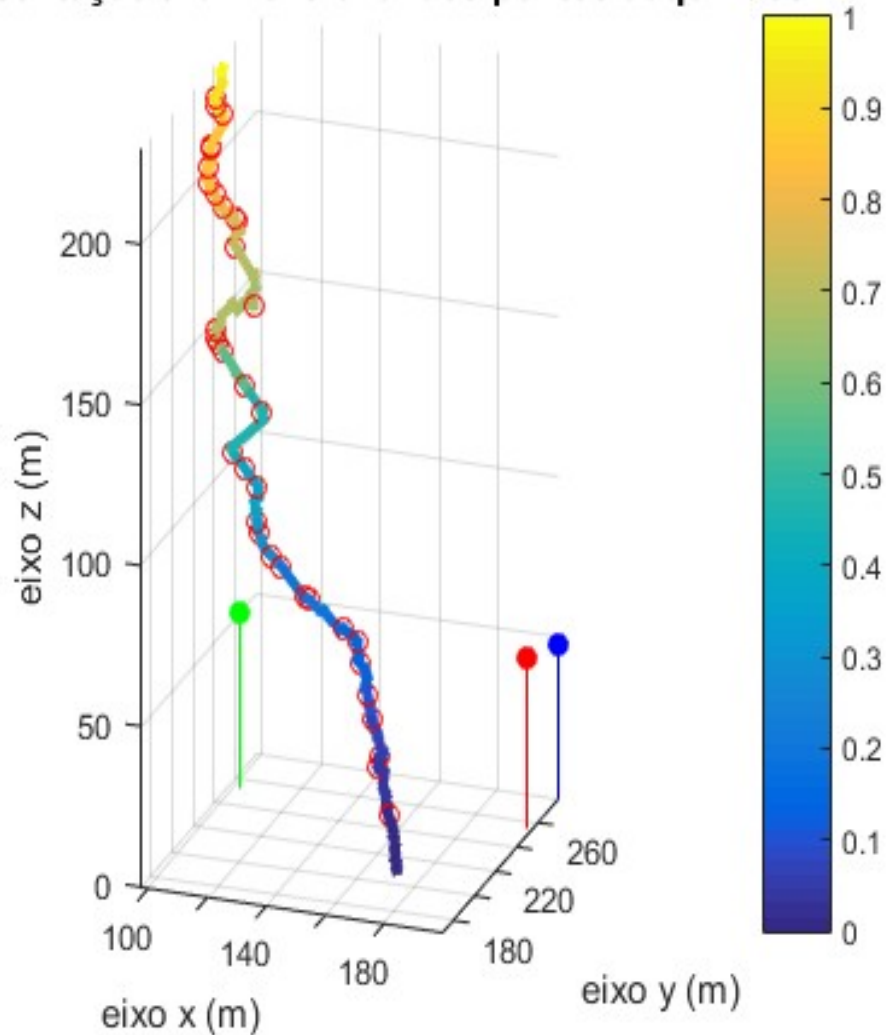


Figura 6: Representação tridimensional do canal condutor. A escala de tempo está em milissegundos ( $10^{-3}$  s). Os pontos em azul, vermelho e verde representam, respectivamente, os para-raios de P1, P2 e P3. Cada círculo vermelho no decorrer do canal condutor representa um frame.

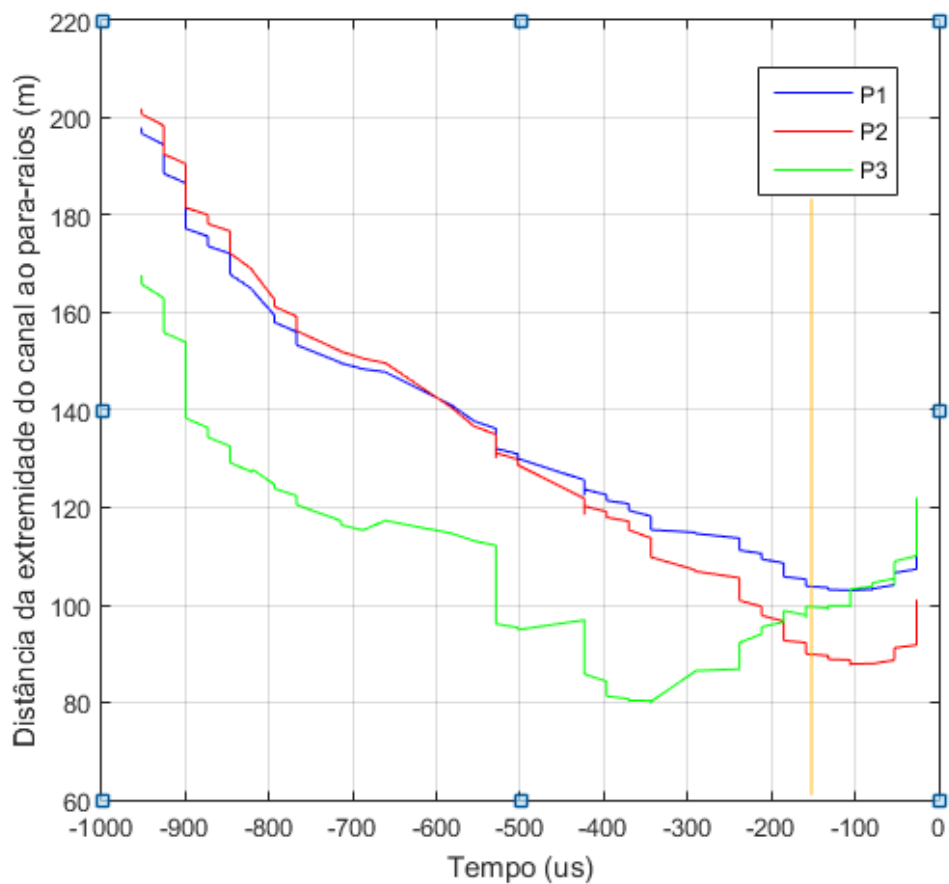


Figura 7: Distância entre a extremidade do líder descendente a cada para-raio (P1, P2 e P3) em função do tempo anterior à conexão. A linha vertical alaranjada demarca o instante em que um líder ascendente não-conectivo (LANC) é observado em P3.

Em posse do comprimento do canal em função do tempo, é possível estimar sua velocidade média. Para tal, o canal foi seccionado em duas partes em função do instante em que acontece o *final jump* da conexão, e apenas os pontos anteriores a esse instante são considerados. Tal análise é importante porque, após o *final jump*, não é possível diferenciar o líder descendente do líder conectivo ascendente gerado pelo poste. O resultado está apresentado na figura 8.

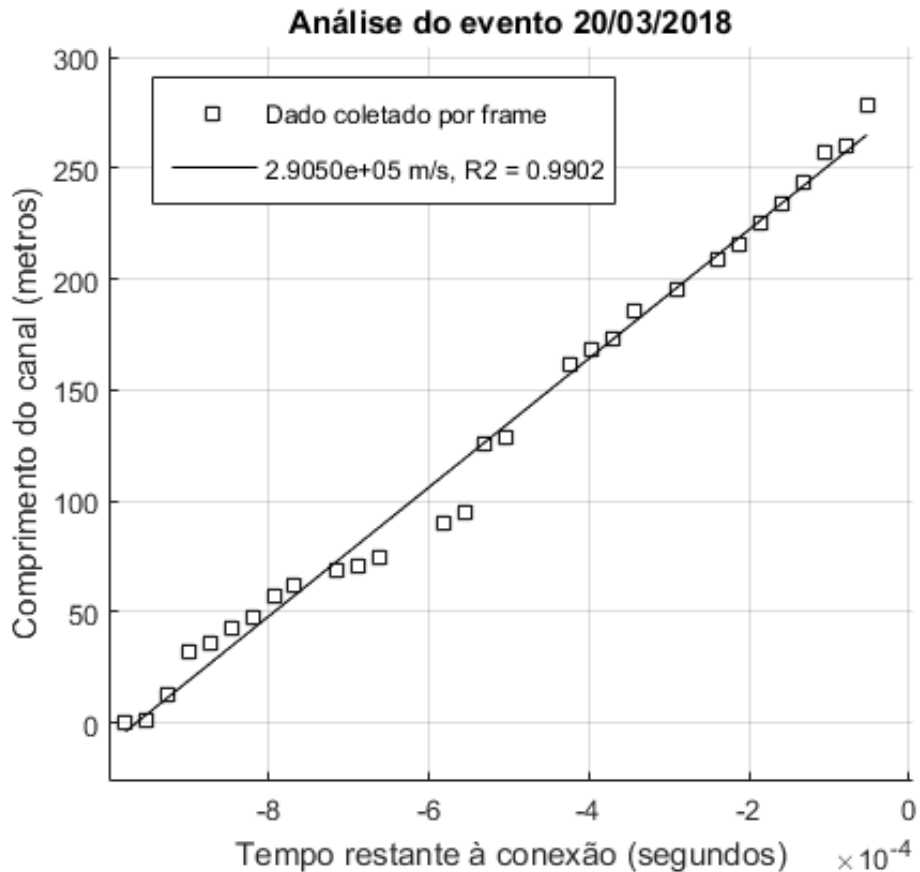


Figura 8: Comprimento do canal condutor em função do tempo, considerando apenas a secção do canal anterior ao *final jump*. A interpolação linear resulta numa velocidade de  $2.905 \times 10^5$  metros por segundo, com um *fitting* de 0.9902

## 4 - Conclusão

Como demonstrado nesse trabalho, as ferramentas desenvolvidas representam um aprimoramento significativo no estudo da geometria do canal condutor de um raio. A tridimensionalização permite que o estudo da velocidade média e do poder de atração a cada para-raios seja mais fidedigno à realidade que a análise bidimensional realizada anteriormente.

Além de apresentar um maior rigor, as ferramentas também permitem uma automação maior do processo de análise. Enquanto anteriormente essa análise requeria um exaustivo processo manual de contagem de *pixel* em uma imagem, agora a mesma tarefa pode ser feita com maior rigor e qualidade com custo ínfimo de tempo com o algoritmo de processamento de imagem.

Ambos os algoritmos, assim como os resultados dessa análise, foram deixados à disposição do grupo ELAT/INPE para utilização em futuros eventos e aprimoramento.

## **Referências bibliográficas**

MATLAB and Statistics Toolbox Release 2012b, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.

Y. Gao, W. Lu, Y. Ma, L. Chen, Y. Zhang, X. Yan, and Y. Zhang (2014), Three-dimensional propagation characteristics of the upward connecting leaders in six negative tall-object flashes in Guangzhou, Atmospheric Research, Volume 149, November 2014, Pages 193-203.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao orientador Dr. Marcelo Saba, pela oportunidade e por todo o suporte no projeto, e à equipe do grupo ELAT/INPE.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pela inclusão no Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica.