



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

## **GEOLOCAL**

Melissa Frigi Mendes

Relatório de Iniciação Científica do programa PIBIC, orientada por Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado, Prof. Dr. Rodolpho Vilhena de Moraes e Prof. Dr. Pedro Levit Kaufmann.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/xx/yy>>

INPE  
São José dos Campos  
2020



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Rodolpho Vilhena de Moraes, Prof. Dr. Pedro Levit Kaufmann e ao Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado por terem me oferecido a oportunidade de participar deste projeto, pelas orientações e dedicações, além de toda ajuda necessária para conduzir-me pelas etapas deste estudo.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) por ter me admitido na realização deste projeto em nome de sua instituição.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos através do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC/INPE).

Aos meus amigos e familiares, em especial minha mãe e irmãos, por todo o incentivo e apoio aos meus estudos e escolhas em minha carreira.



## RESUMO

Conhecer o posicionamento geográfico, atualmente, faz parte de nosso cotidiano através de celulares e outros dispositivos geolocalizadores. Entretanto, há outras aplicações que vão além de nosso uso pessoal: a navegação de aeronaves e embarcações, a correta posição de estações de prospecção de petróleo, topografia e agricultura automatizada, isto sem mencionar aplicações militares. O intuito desta pesquisa está em estudar as questões necessárias para se projetar e construir o hardware e software a serem utilizados para uma prova de conceito prática de um sistema de geolocalização brasileiro, denominado GEOLOCAL, um novo sistema de georreferenciamento a partir do espaço, totalmente livre de quaisquer sistemas GNSS (“Global Navigation Satellite System”), tais como o GPS ou equivalente. O GEOLOCAL foi idealizado pelo Dr. Pierre Kaufmann, fundador do CRAAM (Centro de Radioastronomia e Astrofísica Mackenzie), e pode ser visto como configuração um “GPS invertido” e baseia-se na determinação dos tempos de propagação e de atrasos de sinais entre um transceptor e receptores, localizados na Terra, e uma repetidora no espaço. Apresentamos neste trabalho os princípios de funcionamento do sistema e um algoritmo para a solução das equações envolvidas. Uma simulação na linguagem de programação MATLAB é feita para mostrar o algoritmo desenvolvido e compará-los com resultados de trabalhos acadêmicos prévios realizados sobre o mesmo tema.

Palavras-chave: GPS invertido. Geolocalização. Software.



# **GEOLOCAL**

## **ABSTRACT**

Nowadays the geographic positioning knowledge is part of our daily routine through cellphones and other geolocator devices. However, there are other applications that go beyond our personal use like airships and vessels navigation, the correct position of an oil prospecting station, topography and agriculture automation, not mentioning military applications. This research's purpose is to study the necessary topics in order to project and build the hardware and software to be used for a practical proof of concept of a brazilian geolocation system denominated GEOLOCAL, a new georeferencing system from space entirely free from any GNSS ("Global Navigation Satellite System") system), as such GPS or equivalent. The GEOLOCAL was idealized by Ph.D. Pierre Kaufmann, founder of CRAAM (Mackenzie Radioastronomy and Astrophysics Center), and it can be seen as an "inverted GPS" configuration and it is based on the determination of time propagations and signal delays between a transmitter and receptors located on Earth, and a repeater in space. It is presented in this project the system's functioning principles and an algorithm to the solution of the involved equations. A solution in MATLAB programming language is made to show the developed algorithm e compare them with previous academic projects results regarding this same subject.

Keywords: Inverted GPS. Geolocalization. Software.





## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Escopo inicial do GEOLocal com um sistema de coordenadas ortogonais, 3 bases A, B e C fixas no solo, e a repetidora R no espaço. ....	14
Figura 2.2 – Repetidora R projetada no eixo x do plano xz. ....	15
Figura 2.3: Repetidora R projetada na reta paralela ao eixo y no plano xy. ....	16
Figura 2.4: Repetidora R projetada na reta paralela ao eixo y no plano xy. ....	17
Figura 2.5: Fluxograma do algoritmo principal. ....	19
Figura 3.1: Código desenvolvido do GEOLocal. ....	21
Figura 3.1 – Continuação. ....	21
Figura 3.1: Conclusão. ....	22

## SUMÁRIO

	<b><u>Pág.</u></b>
1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivo.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	13
2.1 Equacionamento e Triangulação das Bases.....	13
2.2 Estudo do Algoritmo .....	19
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	20
4 CONCLUSÃO .....	22
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	23



## 1 INTRODUÇÃO

É notável ao longo da história evolutiva o quão importante se tornou o conhecimento da orientação e localização na superfície terrestre para uma nação, seja de uma pessoa ou qualquer outro objeto. Isso levou a vários países a criarem seus próprios sistemas de geolocalização baseados em satélites, assim como à disputa e dominação de sistemas predominantes utilizados em grande parte do mundo hoje em dia. Tal conhecimento foi sendo aprimorado ao longo dos séculos e hoje exerce uma parcela enorme de importância em setores como transporte, aviação, navegação e etc., como por exemplo transporte de veículos automotores, mineração, navegação de aeronaves, mapeamento e aerofotografia. Deste modo, foram criados sistemas diversos de geolocalização, e os mais dominantes são o GPS (“Global Positioning System”) americano, GLONASS (“Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema”) russo, Galileo europeu e BeiDou-2 chinês.

Atualmente o Brasil faz uso do GPS americano, o qual faz os Estados Unidos da América dominarem o sistema de navegação do mundo, para vários setores econômicos e de transporte. Visando uma possível maior independência brasileira em relação ao sistema americano, vale constar que este projeto ainda está em fase de desenvolvimento visa substituir o GPS americano em alguns setores importantes para a população brasileira, assim como vem acontecendo em vários países ao redor do mundo, visando uma maior independência e evitar possíveis problemas caso aconteça alguma indisponibilidade com o sistema atual em uso, todavia não tem intuito nenhum de competir com o mesmo.

Outro fator a se destacar é o fato de o GEOLOCAL ser livre de qualquer sistema GNSS (“Global Navigation Satellite System”), ou seja, não faz uso exclusivo de satélites de navegação, podendo ser utilizados dispositivos como balões, drones e aeronaves como plataformas, tornando-se um sistema alternativo dos demais.

## 1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho consiste em estudar algoritmos para geolocalização e aplicações com o Geolocal, utilizando a linguagem de programação MatLab. Tal desígnio deverá ser realizado através de equacionamentos pertencentes ao escopo inicial do Geolocal, assim como deverá ser feito um estudo sobre as incertezas presentes no sistema. Como resultado, espera-se obter resultados que coincidem com os de trabalhos e projetos anteriormente desenvolvidos sobre o Geolocal.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O escopo inicial do GEOLocal utiliza de 3 estações fixas cujas coordenadas são conhecidas, 1 repetidora no espaço que representa o hardware responsável por retransmitir o sinal gerado por uma das bases, e 1 alvo P no solo, e todos os aparelhos citados possuem relógios instalados e sincronizados entre si. Uma base, escolhida como base de controle, envia um sinal para a repetidora no espaço que, por sua vez, o retransmite para todas as bases, incluindo a transmissora do sinal. A diferença de tempo registrados de envio e retransmissão do sinal às bases nos permite calcular as distâncias de todas as bases à repetidora, gerando 3 medidas de posição. Com a triangulação dessas posições, é possível encontrar as coordenadas da repetidora e, calculando-se a localização da mesma em 3 tempos diferentes será gerado 3 esferas de centro R, tornando possível calcular a posição do alvo P a partir da intersecção destas com uma quarta esfera.

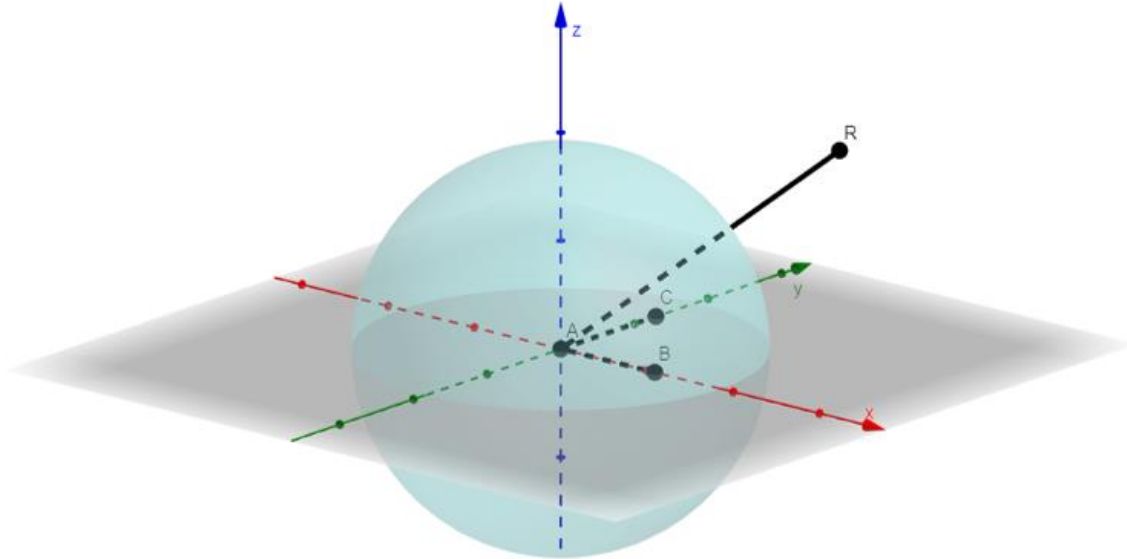
### 2.1 Equacionamento e Triangulação das Bases

O cálculo da distância das bases à R se dá pela seguinte equação:

$$\Delta_n t = \Delta S \cdot c \quad (2.1.1)$$

Onde  $\Delta_{nt}$  representa a diferença de tempos,  $\Delta S$  é a distância entre as bases e a repetidora e  $c$ , a velocidade da luz.

Figura 2.1 – Escopo inicial do GEOLocal com um sistema de coordenadas ortogonais, 3 bases A, B e C fixas no solo, e a repetidora R no espaço.



Fonte: Produção da autora.

Assim, para cada instante de tempo  $n$  obtemos o seguinte sistema de equações:

$$\Delta_1 t_A = \frac{2 \cdot AR}{c} + \delta_{At} + \delta_R + \delta_{Ar} \quad (2.1.2)$$

$$\Delta_1 t_B = \frac{AR}{c} + \frac{BR}{c} + \delta_{At} + \delta_R + \delta_{Br} \quad (2.1.3)$$

$$\Delta_1 t_B = \frac{AR}{c} + \frac{BR}{c} + \delta_{At} + \delta_R + \delta_{Br} \quad (2.1.4)$$

$$\Delta_1 t_P = \frac{AR}{c} + \frac{PR}{c} + \delta_{At} + \delta_R + \delta_{Pr} \quad (2.1.5)$$

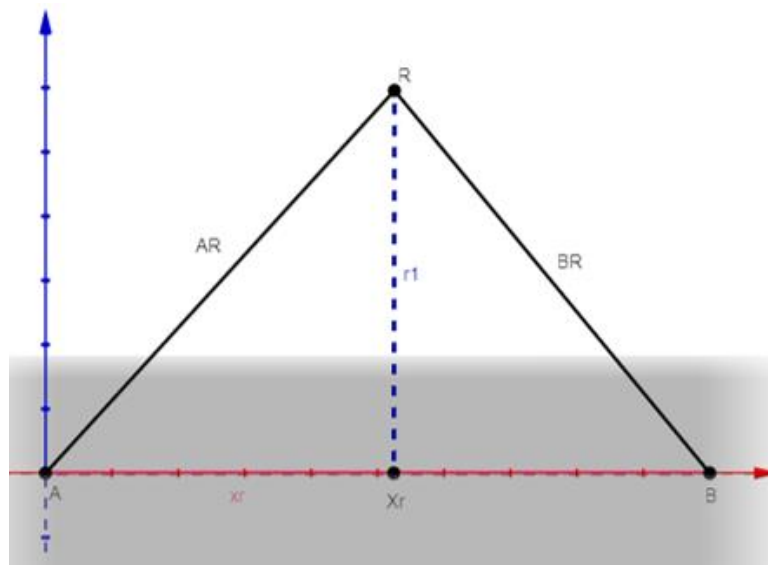
Onde A, B e C são as bases, sendo A escolhida como base de controle, P o alvo e R a repetidora, assim temos AR, BR, CR e PR como as distâncias à repetidora. As medidas  $\delta_{A_t}$ ,  $\delta_{A_r}$ ,  $\delta_{B_r}$ ,  $\delta_{C_r}$ ,  $\delta_R$  e  $\delta_{P_r}$  representam os atrasos em cada relógio de cada aparelho. Para calcular as distâncias entre bases, utiliza-se a fórmula de geometria analítica para cálculo de distância de pontos:

$$\Delta S = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (2.1.6)$$

Deste modo, com as distâncias calculadas, podemos encontrar as coordenadas da repetidora para o tempo  $n = 1$  com as seguintes equações:

$$x_R = \frac{AR^2 - BR^2 + AB^2}{2 \cdot AB} \quad (2.1.7)$$

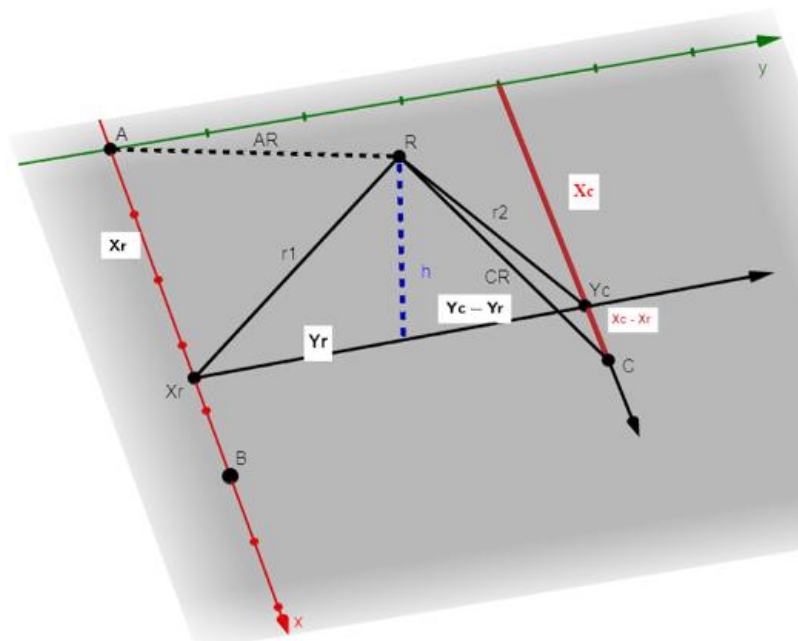
Figura 2.2 – Repetidora R projetada no eixo x do plano xz.



Fonte: Produção da Autora.

$$y_R = \frac{r_1^2 - r_2^2}{2 \cdot y_C} + \frac{y_C}{2} \quad (2.1.8)$$

Figura 2.3: Repetidora R projetada na reta paralela ao eixo y no plano xy.



Fonte: Produção da Autora.

$$z_R = \sqrt{r_1^2 - y_R^2} \quad (2.1.9)$$

Sendo:

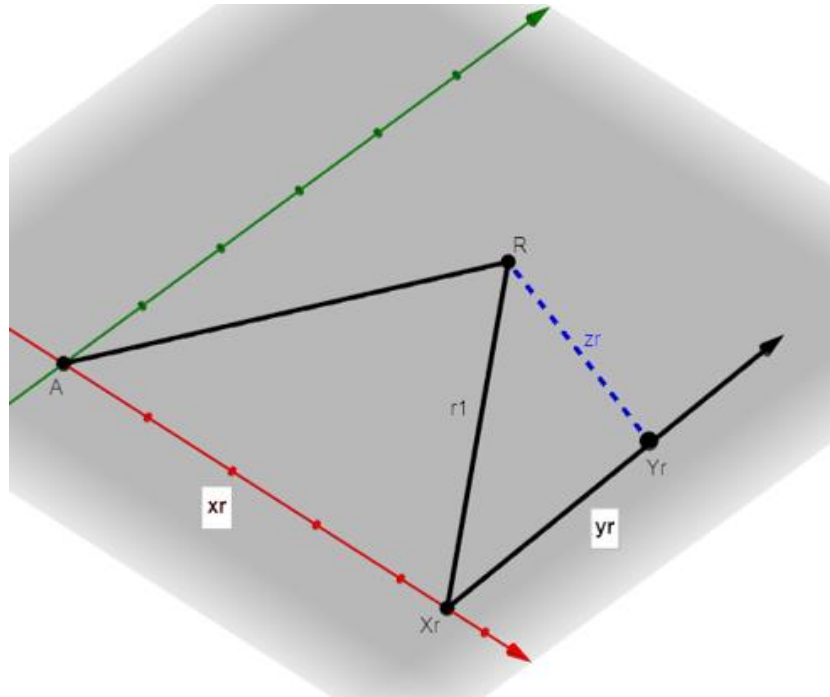
$$r_1^2 = AR^2 - x_R^2 \quad (2.1.9)$$

e



$$r_2^2 = CR^2 - (x_C - x_R)^2 \quad (2.1.10)$$

Figura 2.4: Repetidora R projetada na reta paralela ao eixo y no plano xy.



Fonte: Produção da Autora.

Os dados das coordenadas das bases são geralmente fornecidos no sistema LLA (Latitude, Longitude e Altura), no entanto, para o cálculo da posição da repetidora é realizado pelo sistema ECEF (Earth Centered Earth Fixed). Deste modo, a conversão de coordenadas se faz necessária através das seguintes equações:

$$X = (N + h) \cdot \cos\varphi \cdot \cos\lambda \quad (2.1.11)$$

$$Y = (N + h) \cdot \cos\varphi \cdot \operatorname{sen}\lambda \quad (2.1.12)$$

$$Z = \left( \frac{b^2}{a^2} \cdot N + h \right) \cdot \operatorname{sen}\varphi \quad (2.1.13)$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \operatorname{sen}^2\varphi}} \quad (2.1.14)$$

Temos que  $N$  é o raio de curvatura do geóide, em metros,  $h$  é a altura do elipsoide,  $\varphi$  é a latitude de alguma localização emitida e  $\lambda$  é a longitude. As variáveis  $a$ ,  $b$  e  $e$  indicam o valor do semieixo maior da Terra, o valor do semieixo menor da Terra e a primeira excentricidade calculada sobre o semieixo maior, respectivamente, e são definidas por:

$$a = 6378137 \quad (2.1.15)$$

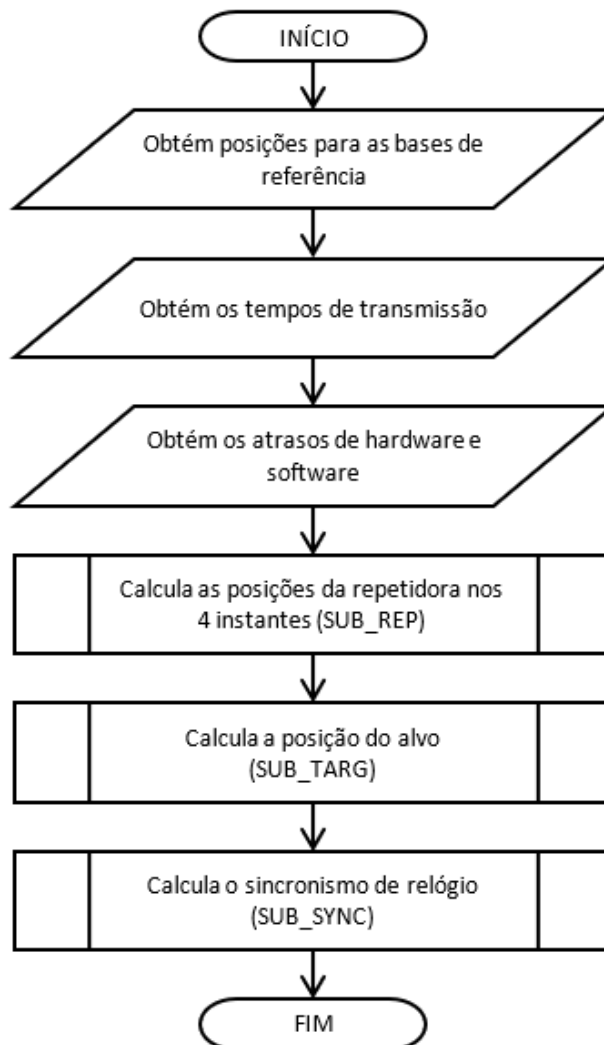
$$b = a \cdot \left( 1 - \frac{1}{298,257223563} \right) \quad (2.1.16)$$

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}} \quad (2.1.17)$$

## 2.2 Estudo do Algoritmo

A elaboração do algoritmo foi realizada com base nos equacionamentos apresentados no tópico anterior e foi desenvolvido na plataforma MATLAB, cujo estudo autônomo da linguagem se deu do início ao longo do desenvolvimento deste projeto. Seguindo-se o fluxograma abaixo, o código apresentado posteriormente cumprirá tal ordem lógica:

Figura 2.5: Fluxograma do algoritmo principal.



Fonte: Macho (2018).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em função ao plano de trabalho proposto, foi possível elaborar um código para calcular a posição da repetidora, ainda que haja resultados da posição da mesma que divergem das simulações em situações teóricas realizadas em outros trabalhos, onde as coordenadas com os dados do exemplo feito são  $x_R=0,9999999999999491$  km,  $y_R=0,1000000000000338$  km e  $z_R=5,000000000000064$  km (Macho, E. P., submetido em 2018, p.52-54) e o código elaborado gerou  $x_R= 0.129399327843549$  km,  $y_R=-1.26010999085084$  km e  $z_R= 4.16957775139297$ km. Os resultados estão, portanto, em atual processo de análise e se faz necessário conferir se estes diferiram pelo método utilizado, por conversões de coordenadas, pela quantidade de bases utilizadas ou se houve algum erro matemático nos cálculos realizados.

Foi desenvolvido também o algoritmo para conversão de coordenadas LLA (Latitude, Longitude e Altura) para ECEF (Earth Centered Earth Fixed), entretanto ainda seriam necessários mais testes com diferentes valores de coordenadas para verificar sua eficácia na conversão compará-los com resultados verídicos de outros testes de conversores.

Figura 3.1: Código desenvolvido do GEOLOCAL.

```

8 %% TRANSFORMAÇÃO DAS COORDENADAS EM ECEF:
9
10 a = 6378137; % valor do semieixo maior da Terra
11 f = 1 / 298.257223563; % achatamento
12 b = a * (1-f); % valor do semieixo menor da Terra
13 e = sqrt((a^2 - b^2) / a^2); % primeira excentricidade
14
15
16 % Transformando graus-minutos-segundos para graus:
17 dms = [...
18 -23 32 51; ...
19 -46 37 33];
20 format long g
21 angleInDegrees = dms2degrees(dms);
22
23
24 % infos que serão fornecidas das bases A, B e C:
25 lat = angleInDegrees(1); %latitude
26 lon = angleInDegrees(2); %longitude
27 h = 730; %altura em metros
28
29
30 % Equações para transformação em ECEF:
31 N = a / (1 - e^2 * sin(lat).^2);
32 X = (N + h) * cos(lat) * cos(lon);
33 Y = (N + h) * cos(lat) * sin(lon);
34 Z = (b^2/a^2 * N+h) * sin(lat);
35

```

(continua)

Figura 3.1 – Continuação.

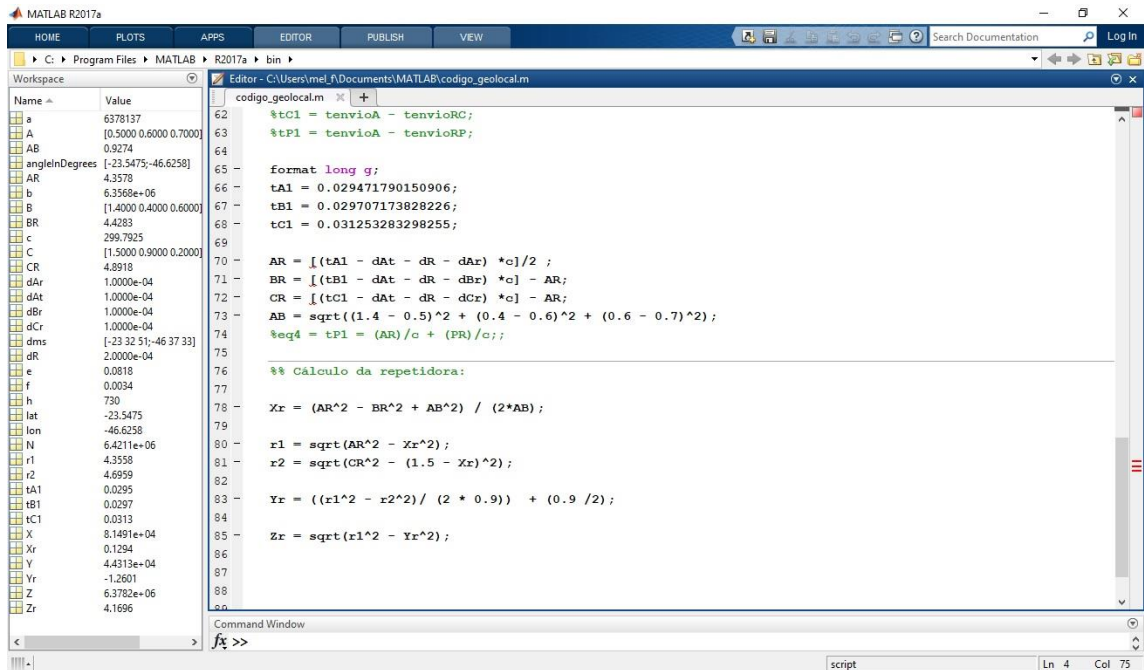
```

36 disp(['As coordenadas são: ' num2str(X) ', ' num2str(Y) ', ' num2str(Z) ']);
37
38
39 %% CÁLCULO DAS MEDIDAS DE POSIÇÃO NOS 4 TEMPOS: (exemplo slide)
40 %Fornecer a posição das bases e tempo conhecidas:
41
42 A= [0.5 0.6 0.7];
43 B= [1.4 0.4 0.6];
44 C= [1.5 0.9 0.2];
45 c = 299.792458;
46
47 format long g
48 dR = 0.0002;
49 dAt = 0.0001;
50 dAr = 0.0001;
51 dBr = 0.0001;
52 dCr = 0.0001;
53
54 %tenvioA = a;
55 %tenvioRA = b;
56 %tenvioRB = c;
57 %tenvioRC = d;
58 %tenvioRP = p;
59
60 %tA1 = tenvioA - tenvioRA;
61 %tB1 = tenvioA - tenvioRB;
62 %tC1 = tenvioA - tenvioRC;

```

(continua)

Figura 3.1: Conclusão.



The screenshot displays the MATLAB R2017a environment. On the left, the Workspace pane lists variables such as 'a', 'A', 'AB', 'angleInDegrees', 'AR', 'b', 'B', 'BR', 'c', 'C', 'CR', 'dAr', 'dAt', 'dBr', 'dCr', 'dms', 'dR', 'e', 'f', 'h', 'lat', 'lon', 'N', 'r1', 'r2', 'tA1', 'tB1', 'tC1', 'X', 'Xr', 'Y', 'Yr', 'Z', and 'Zr'. The main editor window shows the script 'codigo\_geolocal.m' with the following code:

```
62 %tC1 = tenvioA - tenvioRC;
63 %tP1 = tenvioA - tenvioRP;
64
65 format long g;
66 tA1 = 0.029471790150906;
67 tB1 = 0.029707173828226;
68 tC1 = 0.031253283298255;
69
70 AR = [(tA1 - dAt - dR - dAr) * c] / 2 ;
71 BR = [(tB1 - dAt - dR - dBr) * c] - AR;
72 CR = [(tC1 - dAt - dR - dCr) * c] - AR;
73 AB = sqrt((1.4 - 0.5)^2 + (0.4 - 0.6)^2 + (0.6 - 0.7)^2);
74 %eq4 = tP1 = (AR) / c + (PR) / c;
75
76 %% Cálculo da repetidora:
77
78 Xr = (AR^2 - BR^2 + AB^2) / (2*AB);
79
80 r1 = sqrt(AR^2 - Xr^2);
81 r2 = sqrt(CR^2 - (1.5 - Xr)^2);
82
83 Yr = ((r1^2 - r2^2) / (2 * 0.9)) + (0.9 / 2);
84
85 Zr = sqrt(r1^2 - Yr^2);
86
87
88
```

Fonte: Produção da Autora.

#### 4 CONCLUSÃO

O Geolocal provou seu rendimento teórico novamente através desta pesquisa, levando em conta seu escopo inicial e situações teóricas aos quais foram realizados testes e simulações. No entanto, as divergências apresentadas nos resultados da posição da repetidora precisam ser analisadas com minuciosidade a fim de compreender o motivo verídico de tal ocorrência, assim como aprimorar o código criado com a linguagem em questão e incorporar outros ramos relacionadas a este projeto, tais como a sincronização precisa de relógios e os atrasos nas marcações do tempo, aprimoramento do algoritmo e análise de possíveis interferências nos envios de sinais que possam ser causados por fatores externos ou atmosféricos. Do mesmo modo, torna-se necessário estudar e desenvolver futuramente os cálculos matemáticos das intersecções das esferas a fim de ser possível, por fim, encontrar a posição do alvo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MACHO, E. P.; **Implantação de um sistema brasileiro de georreferenciamento independente de outros sistemas de navegação por satélite: o GEOLocal**. 108 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2018.

International Patent Cooperation Treaty PCT/BR2004/000190. Pierre Kaufmann. **Sistema e processo de posicionamento geográfico e espacial**. Patente de Invenção PI 03003968-4, 08 out. 2003. Correspondente à **Geographic and space positioning system and process**. 04 out. 2004

Kaufmann, P. L.; Moraes, R. V.; Kuga, H. K.; Beraldo, L. A.; Marins, C. N. M.; Kaufmann, P.; **Nonrecursive Algorithm for Remote Geolocation Using Ranging Measurements**. Mathematical Problems in Engineering, 2006.

Kaufmann, P.; Kaufmann, P. L.; Pamboukian, S. V. D.; Vilhena de Moraes, R.; **Signal transceiver transit times and propagation delay corrections for ranging and geo-referencing applications**. Mathematical Problems in Engineering, v. 2012, p. 1-15, 2012.

Kaufmann, p.; Kaufmann, P. L.; Vilhena de Moraes, R; Pamboukian, S. V. D.; **A New Independent GPS-Free System for Geo-Referencing from Space**, Positioning. v. 5, p. 37-45, 2014.