

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC**  
CENTRO DE ENGENHARIA, MODELAGEM E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS - CECS

Heitor Rodrigues Savegnago

**ANÁLISE DE SISTEMAS DE GEOLOCALIZAÇÃO BASEADOS EM  
GPS E AOA PARA FOGUETES DE SONDAGEM ATMOSFÉRICA**

Santo André, SP  
2025



Heitor Rodrigues Savegnago

# **ANÁLISE DE SISTEMAS DE GEOLOCALIZAÇÃO BASEADOS EM GPS E AOA PARA FOGUETES DE SONDAGEM ATMOSFÉRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas da Universidade Federal do ABC como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Informação.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Roberto de Santana Casella.

Santo André, SP  
2025



## **Agradecimentos**

Agradeço aos meus pais, que sempre me incentivaram e deram suporte pra seguir atrás dos meus sonhos;

Ao meu orientador do presente trabalho, Dr. Ivan Roberto de Santana Casella, por aceitar me orientar e acompanhar pacientemente ao longo do desenvolvimento deste projeto;

Ao meu orientador do Projeto de Graduação em Computação, Dr. Francisco de Assis Zampirolli, que pacientemente seguiu me orientando mesmo eu levando mais tempo que o esperado;

Ao meu irmão, por me ajudar a entender os problemas que tive programando, mesmo que só estivesse lá pra me ouvir falar a respeito.

Aos amigos que tantas vezes pedi opiniões sobre como escrever e descrever tantas das coisas neste trabalho;

À Universidade Federal do ABC, seus docentes, técnicos e terceirizados, sem o qual eu não poderia chegar aqui;

E a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, no meu caminho até aqui, meu muito obrigado!



## Resumo

Ao ser lançado, um foguete de sondagem atmosférica pode pousar em qualquer lugar dentro do seu raio de alcance, e realizar a busca pode se tornar um grande desafio sem uma estratégia de localização eficaz. Muitos desses veículos contam com localização por GNSS, como o GPS, porém ainda dependem de um sistema de telemetria que garanta a correta transmissão das coordenadas geográficas à equipe de busca. O presente trabalho considera o cenário onde a informação de localização não pôde ser decodificada, porém o sinal de RF ainda é detectável, propondo a aferição de Ângulo de Chegada (*Angle of Arrival*, AoA) para determinar a direção de busca. Foi construída a simulação de um sistema que, baseado na diferença de defasagens em uma malha circular de antenas, é capaz de determinar o AoA do sinal RF incidente. Durante o desenvolvimento, foi almejada a compatibilidade com diferentes *softwares* de resolução numérica, particularmente o GNU Octave e o MATLAB, o que se mostrou um desafio, considerando as limitações no uso de *software* livre. Foram consideradas malhas de antenas com três, cinco e sete antenas. A geometria com menos antenas apresentou uma acurácia geral mais baixa comparada às demais. As simulações contemplaram casos com diferentes níveis de interferência por ruído do tipo AWGN, e consideraram cenários com e sem atenuação no sinal. Em todas as simulações, o valor de  $R^2$  foi acima de 75 % e, em média, acima de 92 %. Esses resultados indicam que o método proposto se mostra eficaz em diferentes contextos.

**Palavras-chave:** *Angle of Arrival*; Radiofrequência; Foguetes de Sondagem Atmosférica; Resolução Numérica; Telemetria; Localização.





## ***Abstract***

*Upon launch, an atmospheric sounding rocket can land anywhere within its range, and conducting the search can be a major challenge without an effective location strategy. Many of these vehicles rely on GNSS location, such as GPS, but they still rely on a telemetry system to ensure the correct transmission of geographic coordinates to the search team. This work considers a scenario where the location information could not be decoded, but the RF signal is still detectable, proposing the Angle of Arrival (AoA) measurement to determine the search direction. A simulation was built for a system that, based on the phase shift difference in a circular antenna array, is capable of determining the AoA of the incident RF signal. During development, compatibility with various numerical resolution software programs was sought, particularly GNU Octave and MATLAB, which proved challenging given the limitations of using free software. Antenna arrays with three, five, and seven antennas were considered. The geometry with fewer antennas showed lower overall accuracy compared to the others. The simulations considered cases with different levels of AWGN noise interference and considered scenarios with and without signal attenuation. In all simulations, the  $R^2$  value was above 75 % and, on average, above 92 %. These results indicate that the proposed method is effective in different contexts.*

**Keywords:** *Angle of Arrival; Radio Frequency; Atmospheric Sounding Rockets; Numerical Resolution; Telemetry; Location.*



## Lista de Figuras

1	Sequência operações simplificada para foguete de sondagem.....	2
2	Representação geométrica de distância e ângulo em relação ao norte entre coordenadas geográficas $\mathbf{A}_g$ e $\mathbf{B}_g$ .....	4
3	Cálculo do ângulo de <i>Bearing</i> $\beta_b$ entre as coordenadas dos Campi Santo André e São Bernardo do Campo da UFABC.....	5
4	Característica de frente de onda a cada $\lambda$ a partir da antena emissora, destaque para $d_F = 8\lambda$ .....	6
5	Diferentes valores de $\theta_{AoA}$ para sinal incidente em par de antenas, sistema com ângulo $\alpha_k = 20^\circ$ em relação à referência. ....	7
6	Diferentes valores para $d$ . ....	8
7	Diferentes distribuições de antenas. ....	9
8	Geometria geral do sistema com $N_{ant} = 3$ .....	10
9	Exemplo de quadro da animação de saída da função <code>generate_fig</code> .....	20
10	Simulação para três antenas, caso ideal ( $SNR \rightarrow \infty$ dB). ....	22
11	Simulação para três antenas, caso $SNR = 0$ dB, sem atenuação.....	22
12	Simulação para três antenas, caso $SNR = 0$ dB, com atenuação. ....	23
13	Simulação para cinco antenas, caso ideal ( $SNR \rightarrow \infty$ dB). ....	24
14	Simulação para cinco antenas, caso $SNR = 0$ dB, sem atenuação. ....	24
15	Simulação para cinco antenas, caso $SNR = 0$ dB, com atenuação.....	25
16	Simulação para sete antenas, caso ideal ( $SNR \rightarrow \infty$ dB). ....	26
17	Simulação para sete antenas, caso $SNR = 0$ dB, sem atenuação. ....	26
18	Simulação para sete antenas, caso $SNR = 0$ dB, com atenuação. ....	27



## Lista de Tabelas

1	Valores de $R^2$ para simulações notáveis com três antenas. ....	21
2	Valores de $R^2$ para simulações notáveis com cinco antenas. ....	23
3	Valores de $R^2$ para simulações notáveis com sete antenas. ....	25



## Códigos

1	Função <code>argument_r</code> , simplificada.....	16
2	Função <code>ref_cos</code> , simplificada. ....	16
3	Função <code>ref_sin</code> , simplificada. ....	16
4	Função <code>signal_r</code> , simplificada. ....	17
5	Função <code>is octave</code> , simplificada. ....	18
6	Função <code>calc_AoA</code> , simplificada. ....	19
7	Função <code>phase_z</code> , simplificada. ....	19
8	Função <code>dephase_A_to_B</code> , simplificada.....	20
9	Função <code>deltas_A_B</code> , simplificada.....	20
10	Arquivo de código <code>bearing.m</code> . ....	33
11	Arquivo de código <code>argument_r.m</code> .....	34
12	Arquivo de código <code>ref_cos.m</code> . ....	34
13	Arquivo de código <code>ref_sin.m</code> . ....	34
14	Arquivo de código <code>signal_r.m</code> . ....	34
15	Arquivo de código <code>is octave.m</code> . ....	36
16	Arquivo de código <code>calc_AoA.m</code> . ....	36
17	Arquivo de código <code>generate_fig.m</code> . ....	38
18	Arquivo de código <code>w_xyt.m</code> .....	44
19	Arquivo de código <code>w_xyt_single.m</code> . ....	49
20	Arquivo de código <code>w_xyt_dat.m</code> . ....	49
21	Arquivo de código <code>w_xyt_auto.m</code> .....	52





## Abreviaturas e Siglas

<b>AoA</b>	Ângulo de Chegada ( <i>Angle of Arrival</i> )
<b>ATT</b>	Atenuação
<b>AWGN</b>	Ruído Gaussiano Branco Aditivo ( <i>Additive White Gaussian Noise</i> )
<b>FFT</b>	Transformada Rápida de Fourier ( <i>Fast Fourier Transform</i> )
<b>GNSS</b>	Sistema Global de Navegação por Satélite ( <i>Global Navigation Satellite System</i> )
<b>GPS</b>	Sistema de Posicionamento Global ( <i>Global Positioning System</i> )
<b>IoT</b>	Internet das Coisas ( <i>Internet of Things</i> )
<b>LoRa</b>	<i>Longe Range</i>
<b>LoS</b>	Linha de visão ( <i>Line of Sight</i> )
<b>NLoS</b>	Sem Linha de visão ( <i>Non Line of Sight</i> )
<b>RF</b>	Radiofrequência ( <i>Radio Frequency</i> )
<b>SDR</b>	Rádio Definido por <i>Software</i> ( <i>Software-Defined Radio</i> )
<b>SNR</b>	Relação Sinal-Ruído ( <i>Signal-Noise Ratio</i> )
<b>UCA</b>	Matriz Circular Uniforme ( <i>Uniform Circular Array</i> )
<b>ULA</b>	Matriz Linear Uniforme ( <i>Uniform Linear Array</i> )



## Símbolos e Operadores

$\mathbf{A}_g$	Coordenada geográfica A
$A_k$	$k$ -ésima antena da malha
$\mathbf{B}_g$	Coordenada geográfica B
$c$	Velocidad da luz no ar
$D_{\text{ant}}$	Maior dimensão da antena emissora para cálculo da distância de Fraunhofer
$d$	Distância entre antenas
$d_{\text{F}}$	Distância de Fraunhofer
$d_{\text{AB}}$	Distância entre coordenadas geográficas A e B
$f$	Frequência do sinal $w$ de interesse
$I_K$	Componente em fase do valor complexo do sinal recebido
$i$	Unidade imaginária, $\sqrt{-1}$
$k$	Índice das antenas da malha
$N_{\text{ant}}$	Número de antenas da malha
$Q_K$	Componente em quadratura do valor complexo do sinal recebido
$R_{\text{Terra}}$	Raio do planeta
$T$	Período do sinal $w$ de interesse
$w$	Sinal de interesse para análise, incidente na malha de antenas
$x_{A_k}$	Componente $x$ de coordenada para a antena $A_k$
$y_{A_k}$	Componente $y$ de coordenada para a antena $A_k$
$Z_K$	Valor complexo do sinal recebido na antena $A_k$
$\alpha_k$	Ângulo formado pelo par de antenas $A_k$ e $A_{k+1}$ em relação à geometria do sistema
$\beta_{\pm k}$	Par de ângulos simétricos calculados a partir do sinal incidente no par de antenas $A_k$ e $A_{k+1}$
$\beta_b$	Ângulo de <i>bearing</i> relativo
$\Delta\Phi_k$	Diferença de fase em par de antenas $A_k$ e $A_{k+1}$
$\Delta\theta$	Diferença entre os ângulos $\theta_{\mathbf{A}_g}$ e $\theta_{\mathbf{B}_g}$
$\Delta\phi$	Diferença entre os ângulos $\phi_{\mathbf{A}_g}$ e $\phi_{\mathbf{B}_g}$
$\delta$	Intervalo de quantização e de filtro para valores de $\Theta$

$\Theta$	Conjunto de todos os valores $\theta_{\pm k}$ aferidos
$\Theta_{\lfloor \bullet \rfloor}$	Valores de $\Theta$ quantizados por $\delta$
$\Theta_{\mathbf{F}}$	Valores de $\Theta$ filtrados
$\theta_{\mathbf{AoA}}$	Valor do Ângulo de Chegada AoA
$\theta_{\pm k}$	Par de possíveis ângulos de $\theta_{\mathbf{AoA}}$ referentes ao par de antenas $A_k$ e $A_{k+1}$
$\theta_{\mathcal{M}_o}$	Moda estatística do conjunto $\Theta_{\lfloor \bullet \rfloor}$
$\theta_{\mathbf{A}_g}$	Longitude da coordenada geográfica A
$\theta_{\mathbf{B}_g}$	Longitude da coordenada geográfica B
$\lambda$	Comprimento de onda do sinal $w$ de interesse
$\rho$	Raio do polígono regular formador da malha de antenas
$\Phi_k$	Fase do sinal na antena $k$
$\phi_{\mathbf{A}_g}$	Latitude da coordenada geográfica A
$\phi_{\mathbf{B}_g}$	Latitude da coordenada geográfica B
$\omega$	Frequência angular do sinal $w$ de interesse
$\widetilde{\mathcal{H}}$	Operação estatística mediana para o conjunto $\mathcal{H}$
$\mathcal{M}_o(\mathcal{H})$	Operação estatística moda para o conjunto $\mathcal{H}$
$\mathcal{I}m(h)$	Parte imaginária do valor complexo $h$
$\mathcal{R}e(h)$	Parte real do valor complexo $h$
$\lfloor h \rfloor$	Operação arredondar, arredonda o valor de $h$ para o inteiro mais próximo

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Motivação .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do documento .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Fundamentação teórica .....</b>	<b>3</b>
2.1.1	Direcionamento por coordenadas geográficas .....	3
2.1.2	Estimar AoA utilizando malha de antenas .....	6
<b>2.2</b>	<b>Trabalhos relacionados .....</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>14</b>
<b>3.1</b>	<b>Simulação .....</b>	<b>14</b>
3.1.1	Parâmetros envolvidos .....	14
3.1.2	Funções auxiliares .....	16
3.1.3	Função de cálculo para AoA .....	18
3.1.4	Função de geração saída visual .....	18
3.1.5	Função geral da simulação .....	20
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>21</b>
<b>4.1</b>	<b>Performance da simulação .....</b>	<b>21</b>
4.1.1	Três antenas .....	21
4.1.2	Cinco antenas .....	23
4.1.3	Sete antenas .....	25
<b>4.2</b>	<b>Problemas encontrados .....</b>	<b>27</b>
4.2.1	Compatibilidade de código .....	27
4.2.2	Limitações de <i>software</i> livre .....	27
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>28</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>30</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>33</b>
<b>A</b>	<b>CÓDIGOS DESENVOLVIDOS PARA SIMULAÇÃO .....</b>	<b>33</b>
<b>A.1</b>	<b>Simulação de direcionamento GNSS .....</b>	<b>33</b>
<b>A.2</b>	<b>Simulação de AoA .....</b>	<b>34</b>
A.2.1	Funções auxiliares .....	34

A.2.2	Função de cálculo para AoA.....	36
A.2.3	Função de geração saída visual .....	38
A.2.4	Função geral da simulação.....	44
A.2.5	Arquivos de simulação em sequência.....	49

# 1 Introdução

Este capítulo apresenta a motivação para o trabalho proposto, os objetivos gerais e secundários, e uma apresentação da estrutura geral do trabalho.

## 1.1 Motivação

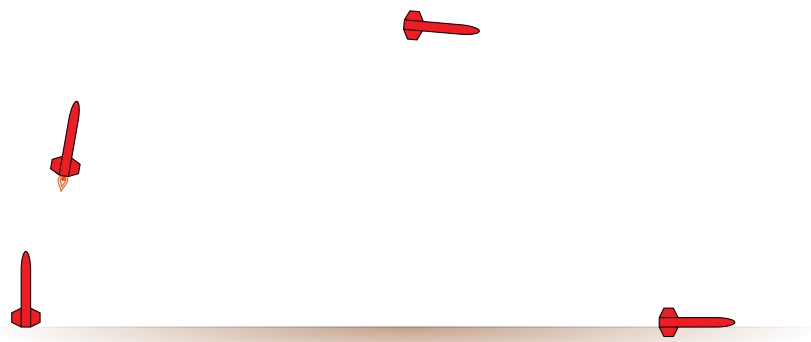
Foguetes de sondagem atmosférica são veículos aeroespaciais sub-orbitais utilizados para levar sensores e experimentos científicos a altos níveis atmosféricos, com o intuito de realizar estudos e análises relacionados às diversas condições ali presentes [1]. Estes veículos geralmente utilizam motor de propelente sólido, de um ou dois estágios, e são equipados com sistemas de controle, telemetria e recuperação, além de transportarem o experimento científico, denominado carga-paga [2, 3]. Algumas das vantagens desses veículos são o baixo custo e a menor necessidade de alcance para sistemas de telemetria e rastreo, tendo em vista que não entram em órbita [4].

No contexto de foguetes de sondagem, existem competições que fomentam o desenvolvimento e a competitividade em equipes universitárias de foguetemodelismo [5]. Algumas dessas competições tem grande parte de suas categorias definidas nas bases de foguetes de sondagem, com apogeu de voo entre 1 km e 10 km de altura acima do nível do solo. Nestes casos, a sequência de operações normal do foguete, simplificada na Figura 1, consiste em: ignição do primeiro estágio do motor, decolagem, período propulsionado, término de queima do primeiro estágio, desacoplamento do primeiro estágio, ignição do segundo estágio, segundo período propulsionado, término de queima do segundo estágio, início do período inercial balístico, apogeu, detecção do apogeu pelos sistemas embarcados, liberação do paraquedas piloto, fase de desaceleração do paraquedas piloto, liberação do paraquedas principal a certa altitude, fase de desaceleração do paraquedas principal e finalmente o pouso [2, 3]. Desacoplamento do primeiro estágio, ignição e fase propulsionada do segundo somente se aplicam a foguetes de dois estágios.

A partir do momento do pouso, o próximo objetivo nessas competições consiste em localizar o foguete, vários métodos podem ser empregados nessa situação, desde cores chamativas no veículo e paraquedas, até sinais sonoros. Essas competições geralmente recomendam, e até exigem, a presença de um GNSS, capaz de transmitir as coordenadas do veículo após o pouso para localização, como um GPS [6].

O processo de localização baseada em dados simples de GNSS, latitude e longitude, pode se tornar mais complicado se o grupo de busca não tem certeza de como encontrar essas coordenadas. Existem dispositivos de GNSS portáteis, porém estes podem criar dificuldades na interface com os dados recebidos da telemetria do foguete. Neste caso, seria possível desenvolver um dispositivo capaz de lidar diretamente com as informações de localização fornecidas pela telemetria e guiar o grupo de busca na direção correta.

Figura 1: Sequência operações simplificada para foguete de sondagem.



Fonte: Autor

Os dados recebidos da telemetria ainda precisam de certo grau de confiabilidade para que sejam devidamente processados e tratados, o que pode ser um problema se o veículo estiver longe do grupo de busca ou o dispositivo de GNSS a bordo não esteja apto a fornecer dados corretamente. Nesse caso, ainda é possível buscar o foguete utilizando o próprio sinal da telemetria, independente dos dados transmitidos.

## 1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver e projetar um dispositivo portátil capaz de indicar a direção da origem de um sinal de RF baseado em métodos de detecção de AoA.

Como objetivo secundário, a análise comparativa com um sistema de utilidade semelhante, porém baseado inteiramente em coordenadas de GNSS.

## 1.3 Estrutura do documento

O trabalho proposto está organizado em cinco capítulos, apresentando, após este introdutório, mais quatro capítulos. O Capítulo 2 traz um levantamento bibliográfico, contendo fundamentação teórica e revisão de trabalhos relacionados. O Capítulo 3 apresenta o detalhe da metodologia adotada na construção do trabalho. No Capítulo 4 são apresentados detalhes sobre a performance da simulações realizadas e problemas encontrados. Por fim, o Capítulo 5 traz as considerações finais, conclusões e sugestões para trabalhos futuros que podem resultar em melhorias na presente proposta.

O documento também conta com o Apêndice A, que apresenta o conjunto de códigos construídos ao longo do desenvolvimento do trabalho.



## 2 Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica utilizada ao longo do trabalho, bem como um breve levantamento de trabalhos relacionados, que mostram a relevância do assunto abordado.

### 2.1 Fundamentação teórica

A construção deste trabalho fundamentou-se em princípios teóricos, utilizando as bases de direcionamento por coordenadas geográficas, apresentada na Subseção 2.1.1, e princípios de eletromagnetismo para estimar o AoA, apresentados na Subseção 2.1.2.

#### 2.1.1 Direcionamento por coordenadas geográficas

Coordenadas geográficas são definidas por dois valores, latitude e longitude, associadas a coordenadas esféricas referenciadas a partir do centro da terra, assumindo o raio da coordenada como o raio médio da superfície do planeta, cerca de  $R_{\text{Terra}} = 6371 \cdot 10^3 \text{ m}$  [7, 8]. A latitude equivale à componente polar  $\phi$  centralizada na linha do equador, enquanto a longitude equivale à componente  $\theta$  centralizada no meridiano de Greenwich [7, 9].

Conhecendo as coordenadas de dois pontos distintos A e B, é possível determinar seu ângulo de *bearing*  $\beta_b$  relativo, referente ao norte, ou seja, o ângulo da direção a se seguir partindo do ponto A para chegar ao ponto B, a partir da direção norte no ponto de origem A [9].

Sendo  $\mathbf{A}_g$  e  $\mathbf{B}_g$  duas coordenadas geográficas,  $\phi_{\mathbf{A}_g}$  e  $\phi_{\mathbf{B}_g}$  suas respectivas latitudes, e  $\theta_{\mathbf{A}_g}$  e  $\theta_{\mathbf{B}_g}$  suas respectivas longitudes, conforme ilustrado na Figura 2.

Calculam-se  $\Delta_\phi$  e  $\Delta_\theta$  conforme Equações 1 e 2, respectivamente.

$$\Delta_\phi = \phi_{\mathbf{B}_g} - \phi_{\mathbf{A}_g} \quad (1)$$

$$\Delta_\theta = \theta_{\mathbf{B}_g} - \theta_{\mathbf{A}_g} \quad (2)$$

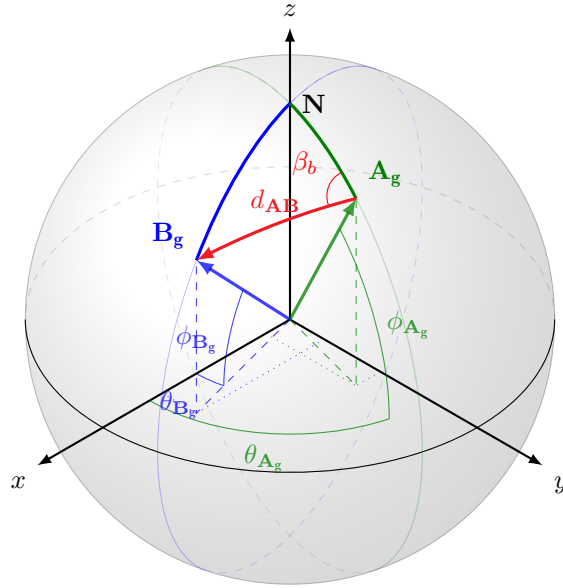
Através da lei dos haversines é possível obter a distância mínima  $d$  entre as coordenadas, sobre a superfície, e também o ângulo de *Bearing*  $\beta_b$  formado no vértice  $\mathbf{A}_g$  do triângulo esférico  $\mathbf{N}\mathbf{A}_g\mathbf{B}_g$  [8]. Para o cálculo de distância, os ângulos devem ser tratados em radianos.

$$X = \cos(\theta_{\mathbf{B}_g}) \cdot \sin(\Delta_\phi) \quad (3)$$

$$Y = \cos(\theta_{\mathbf{A}_g}) \cdot \sin(\theta_{\mathbf{B}_g}) - \sin(\theta_{\mathbf{A}_g}) \cdot \cos(\theta_{\mathbf{B}_g}) \cdot \cos(\Delta_\phi) \quad (4)$$

$$Z = \sin^2\left(\frac{\Delta_\theta}{2}\right) + \cos(\theta_{\mathbf{B}_g}) \cdot \cos(\theta_{\mathbf{A}_g}) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta_\phi}{2}\right) \quad (5)$$

Figura 2: Representação geométrica de distância e ângulo em relação ao norte entre coordenadas geográficas  $\mathbf{A}_g$  e  $\mathbf{B}_g$ .



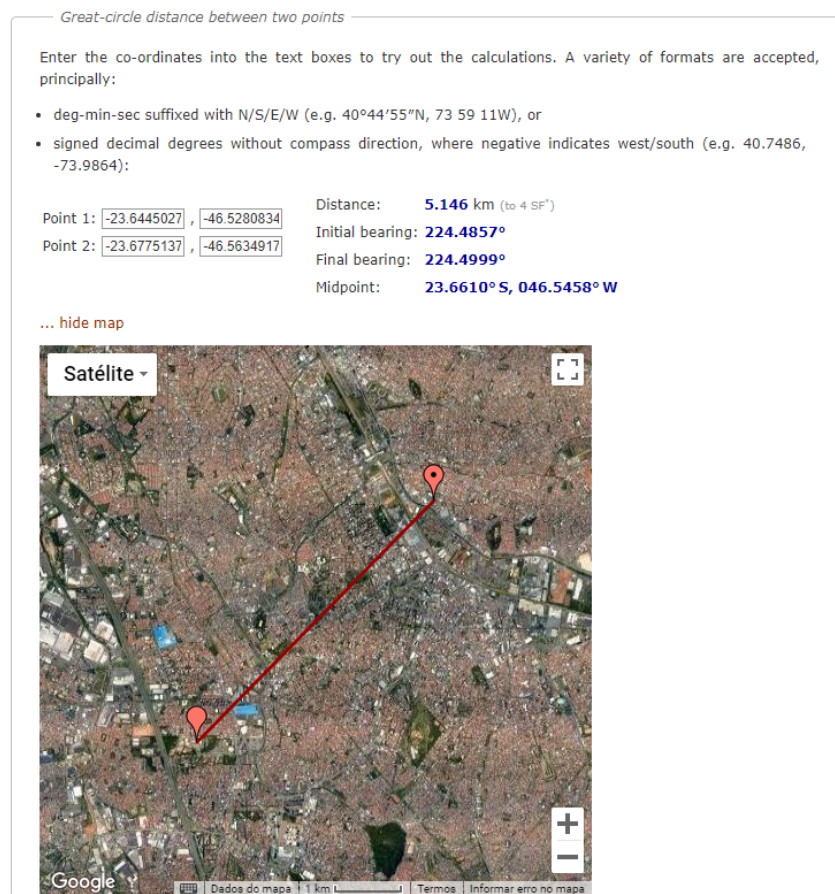
Fonte: Autor.

$$\beta_b = \arctan\left(\frac{X}{Y}\right) - \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

$$d_{AB} = R_{\text{Terra}} \cdot 2 \cdot \arctan\left(\frac{\sqrt{Z}}{\sqrt{1-Z}}\right) \quad (7)$$

O ângulo  $\beta_b$  calculado aqui é referente à direção cardinal Norte, assim, uma equipe de busca equipada com uma bússola simples seria capaz de seguir a direção correta. A Figura 3 apresenta a aplicação desenvolvida por Veness, capaz de calcular o ângulo de *Bearing* entre duas coordenadas, note que, neste caso, o ângulo referido é relacionado à direção cardinal Leste [8].

Figura 3: Cálculo do ângulo de *Bearing*  $\beta_b$  entre as coordenadas dos Campi Santo André e São Bernardo do Campo da UFABC.



Fonte: Veness 2019 [8]

### 2.1.2 Estimar AoA utilizando malha de antenas

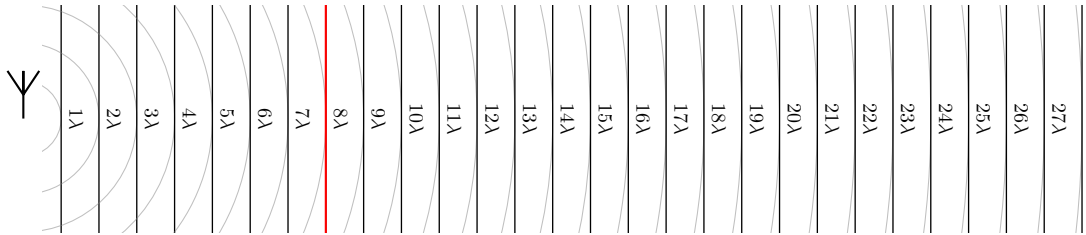
Analisando a defasagem de um sinal de RF incidindo em uma malha de antenas, é possível estimar seu Ângulo de Chegada (*Angle of Arrival*, AoA), ou seja, determinar a direção do emissor do sinal em relação ao sistema. Este valor é calculado utilizando dados como a distância entre as antenas, o comprimento de onda  $\lambda$  do sinal e a velocidade da luz no meio, usualmente tomada como  $c = 299792458,6 \pm 0,3 \text{ m s}^{-1}$  no ar [10, 11, 12, 13]. A Equação 8 apresenta a relação do comprimento de onda  $\lambda$  com a frequência  $f$ , a frequência angular  $\omega$  e a velocidade da luz  $c$ .

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi \cdot c}{\omega} \quad (8)$$

Se um emissor de sinal estiver suficientemente distante, é possível considerar que a frente de onda tem um comportamento planar, essa característica simplifica as operações envolvidas. A distância de Fraunhofer ( $d_F$ ) é a mínima para essa condição, ela define o início da região de *far-field*, conforme apresentado na Equação 9, onde  $D_{\text{ant}}$  é a maior dimensão da antena emissora [14]. Tomando  $D_{\text{ant}} = 2\lambda$ , para uma antena de dipolo, obtém-se  $d_F = 8\lambda$ . A Figura 4 ilustra o comportamento planar de uma frente de onda, com destaque na distância  $d_F$ .

$$d_F = \frac{2 \cdot D_{\text{ant}}^2}{\lambda} \Rightarrow d_F = \frac{2 \cdot (2 \cdot \lambda)^2}{\lambda} = 8\lambda \quad (9)$$

Figura 4: Característica de frente de onda a cada  $\lambda$  a partir da antena emissora, destaque para  $d_F = 8\lambda$ .



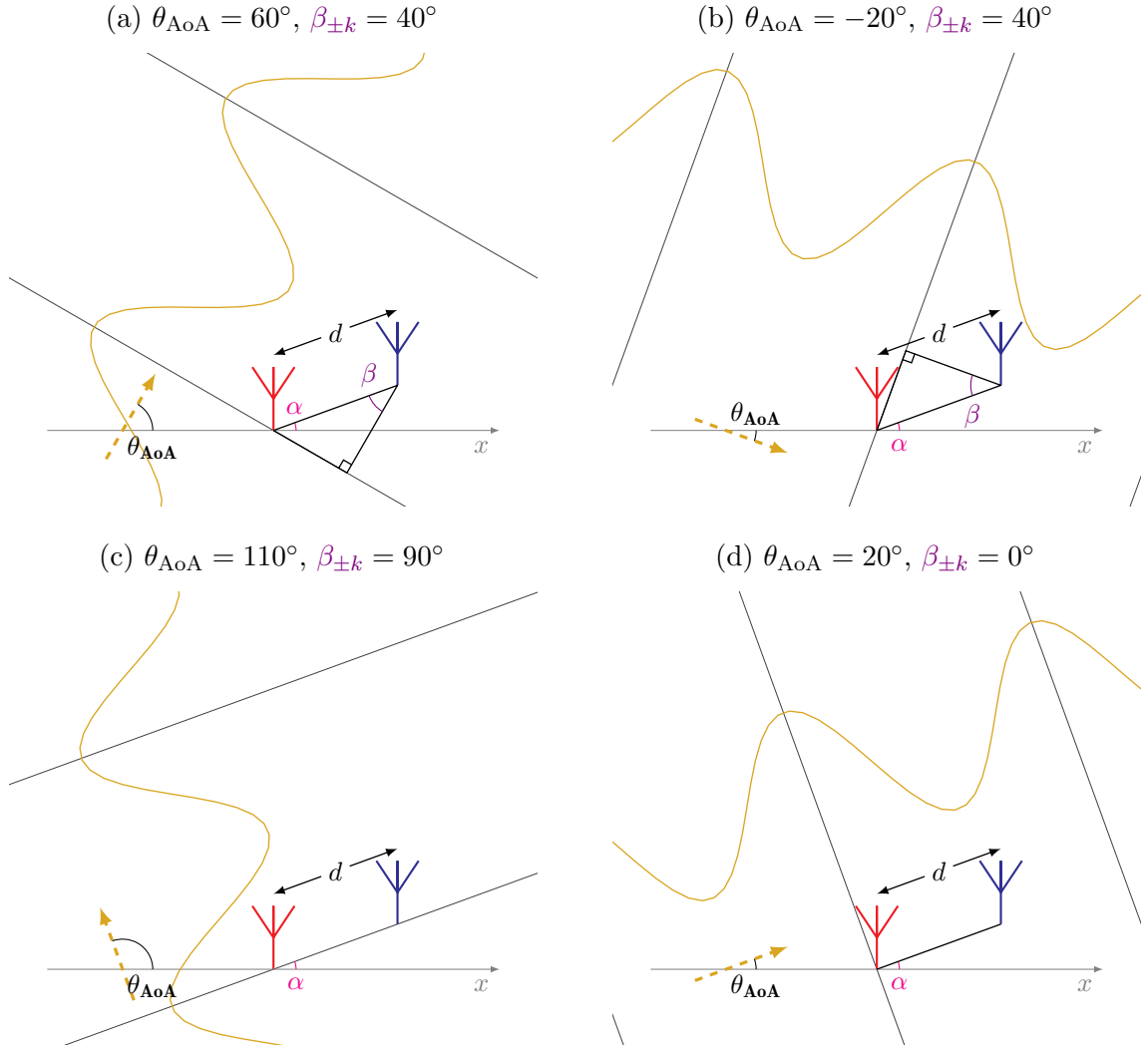
Fonte: Autor.

Tomando agora um par de antenas separadas por uma distância fixa  $d$ , torna-se viável fazer a análise trigonométrica entre as antenas e a frente de onda incidente, onde essa distância  $d$  será a hipotenusa do triângulo retângulo formado. Para realizar esta análise, ainda é necessário conhecer uma segunda dimensão do triângulo retângulo envolvido, esta é obtida da defasagem  $\Delta\Phi_k$  dos sinais incidentes nas antenas, conforme apresentado na Equação 10. A Figura 5 apresenta quatro casos de chegada do sinal de RF em um par de antenas.

$$d \cdot \cos(\beta_{\pm k}) = \lambda \cdot \frac{\Delta\Phi_k}{2\pi} \quad (10)$$

É importante ressaltar que um sistema com um único par de antenas não é suficiente

Figura 5: Diferentes valores de  $\theta_{AoA}$  para sinal incidente em par de antenas, sistema com ângulo  $\alpha_k = 20^\circ$  em relação à referência.



Fonte: Autor.

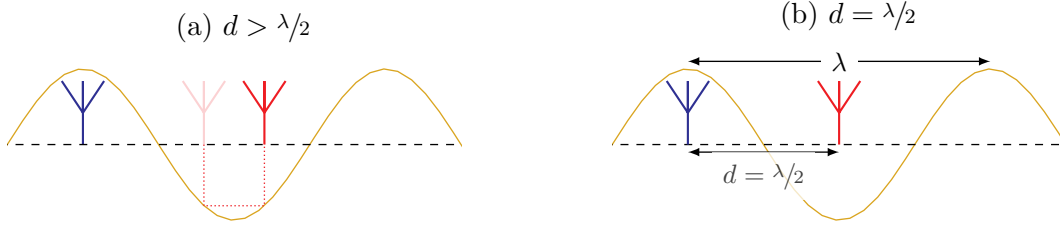
para determinar completamente o  $\theta_{AoA}$ , já que o valor calculado de  $\beta_{\pm k}$  é igual para casos simétricos em relação ao par de antenas, criando um caso de ambiguidade. As Figuras 5a e 5b apresentam exemplos de diferentes valores de  $\theta_{AoA}$  para o mesmo valor de  $\beta_{\pm k}$ . Existem ainda dois casos notáveis, onde o sinal chega alinhado ao par de antenas ou perpendicular a elas, apresentados respectivamente nas Figuras 5c e 5d.

A escolha da distância  $d$  entre as antenas deve ser feita de forma a otimizar a resolução da medida de defasagem, com a maior distância possível. Porém é necessário evitar ambiguidades na análise, por se tratar de um sinal periódico, o valor se repetirá a cada  $\lambda$ , e terá valores simétricos quando  $d > \lambda/2$ , ilustrado na Figura 6a. Adota-se então  $d = \lambda/2$ , conforme apresentado na Figura 6b e Equação 11 [11, 12, 13].

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad (11)$$

Para contornar a ambiguidade de simetria, é possível adicionar mais antenas à malha.

Figura 6: Diferentes valores para  $d$ .



Fonte: Autor.

O conjunto de  $N_{\text{ant}}$  antenas deve respeitar a distância  $d$  entre as antenas de um par, e pode ser disposto como um polígono regular com  $N_{\text{ant}}$  lados de tamanho  $d$ , onde cada antena está em um vértice. A Figura 7 apresenta exemplos dessa disposição de antenas, note que valores pares de  $N_{\text{ant}}$  implicam que existirão pares de antenas paralelos, que resultam em leituras redundantes.

A Equação 12 descreve o raio  $\rho$  do círculo que circunscreve o polígono regular de  $N_{\text{ant}}$  antenas. Este raio equivale à distância das antenas em relação ao ponto central do polígono.

$$\rho = \frac{d}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N_{\text{ant}}}\right)} \quad (12)$$

Cada antena é identificada por um índice  $k$ , conforme a Equação 13, e tem sua coordenada espacial definida como um valor complexo descrito na Equação 14. Essas coordenadas são definidas como números complexos para simplificar a análise do ângulo  $\alpha_k$  em que um par de antenas  $A_k$  e  $A_{k+1}$  se dispõe em relação à geometria do sistema, conforme Equação 15.

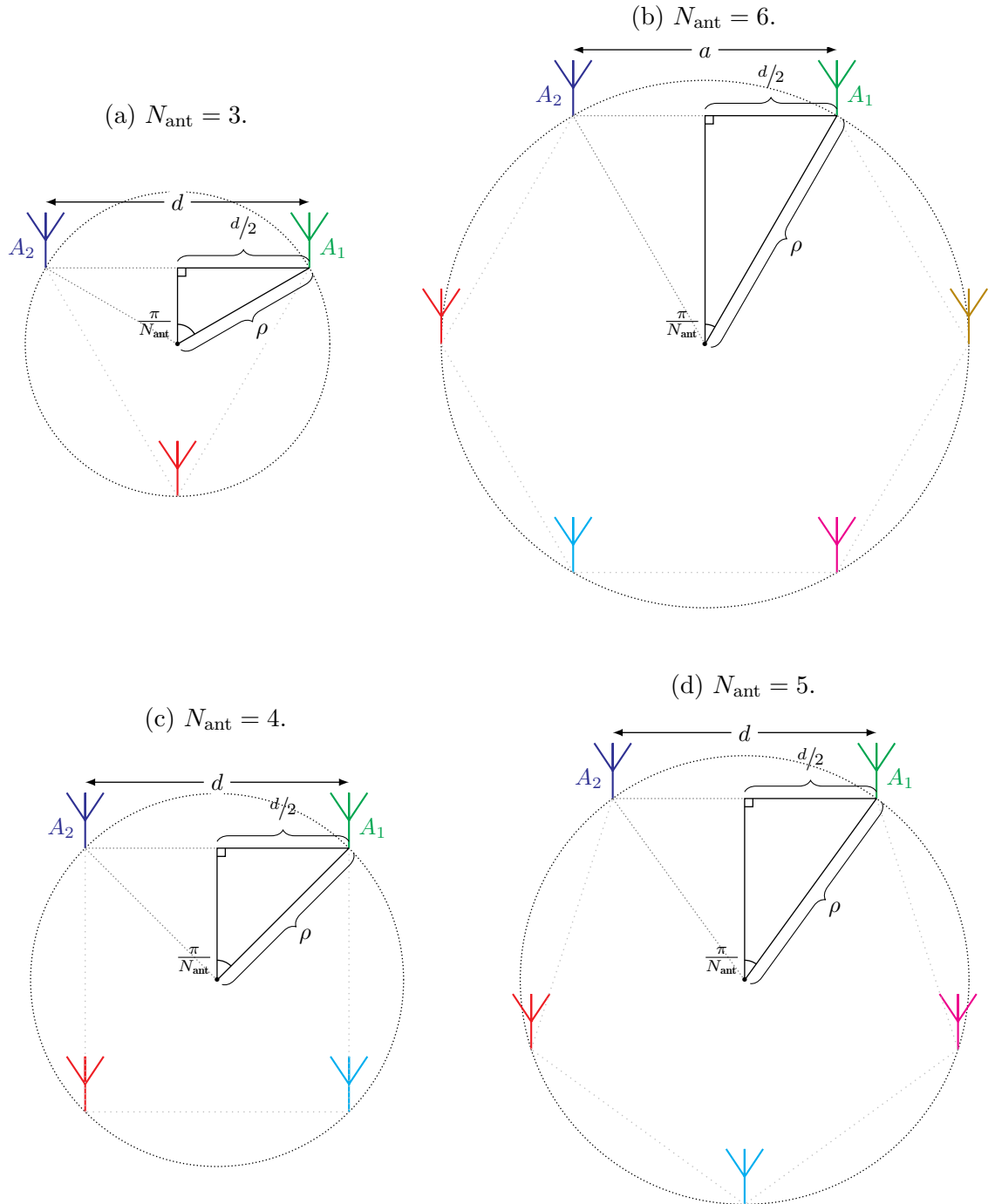
$$k = \{1, 2, \dots, N_{\text{ant}}\} \quad (13)$$

$$A_k = \rho \cdot \exp\left(i \cdot k \cdot \frac{2\pi}{N_{\text{ant}}}\right) = (\mathcal{R}e(A_k), \mathcal{I}m(A_k)) = (x_{A_k}, y_{A_k}) \quad (14)$$

$$\alpha_k = \arg(A_k - A_{k+1}) \quad (15)$$

Para calcular a fase em uma antena, é interessante representar o sinal recebido como um valor complexo. Uma forma de obter o complexo de fase consiste em analisar a correlação do sinal incidente  $w$  com sinais de referência de mesma frequência que o sinal de interesse, em um período completo, Equação 16. Os valores  $I_K$  (em fase) e  $Q_K$  (em quadratura) são calculados respectivamente pela correlação com um cosseno, conforme Equação 17, e com um seno, conforme Equação 18. A Equação 19 apresenta o valor complexo  $Z_K$  de fase para a antena  $A_k$ .

Figura 7: Diferentes distribuições de antenas.



Fonte: Autor.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f} \quad (16)$$

$$I_K = \int_0^T \cos(\omega \cdot \tau) \cdot w(\tau, x_{A_k}, y_{A_k}) \partial \tau \quad (17)$$

$$Q_K = \int_0^T \sin(\omega \cdot \tau) \cdot w(\tau, x_{A_k}, y_{A_k}) \partial \tau \quad (18)$$

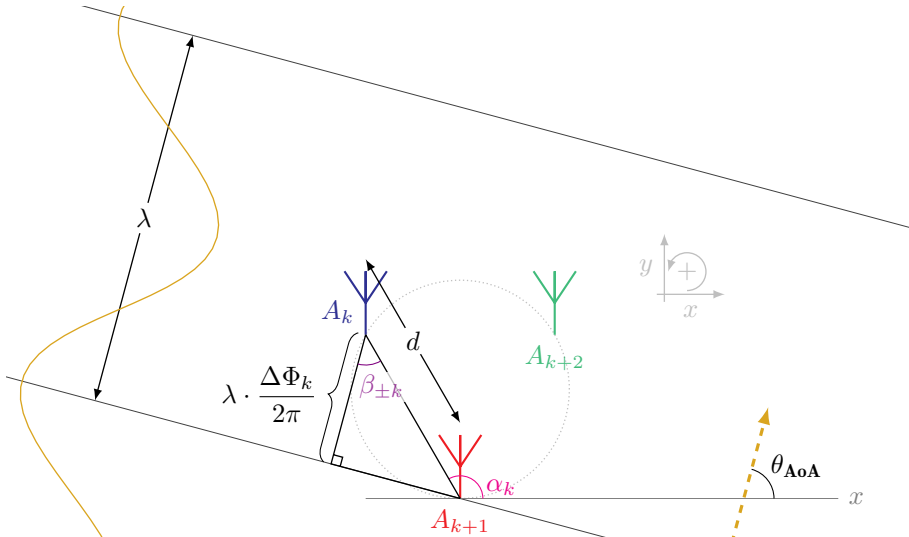
$$Z_K = \frac{\omega}{\pi} \cdot (I_K + \imath Q_K) \quad (19)$$

O cálculo de defasagem de sinal em um par de antenas consiste na análise de diferença de fase dos valores  $Z_K$  e  $Z_{k+1}$  do par de antenas  $A_k$  e  $A_{k+1}$ , conforme apresentado na Equação 20. Obtido o valor de defasagem  $\Delta\Phi_k$  entre o par de antenas, finalmente é possível calcular o ângulo  $\beta_{\pm k}$  através da Equação 21, note que a simplificação somente é possível com valor de  $d = \lambda/2$ . A Figura 8 apresenta a geometria do sistema destacando os valores de interesse na análise de um dos pares de antenas, tomando  $N_{\text{ant}} = 3$ .

$$\Delta\Phi_k = \Phi_k - \Phi_{k+1} = \arg(Z_K) - \arg(Z_{k+1}) = \arg(Z_K \cdot \overline{Z_{k+1}}) \quad (20)$$

$$\beta_{\pm k} = \arccos\left(\frac{\chi}{d} \cdot \frac{\Delta\Phi_k}{2\pi}\right) \quad (21)$$

Figura 8: Geometria geral do sistema com  $N_{\text{ant}} = 3$ .



Fonte: Autor.

Para cada par de antenas, são calculados dois valores  $\theta_{\pm k}$  conforme a Equação 22, equivalentes a dois valores possíveis para o  $\theta_{\text{AoA}}$ . A Equação 23 define o conjunto  $\Theta$  dos valores aferidos de  $\theta_{\pm k}$  para todos os pares de antenas do sistema, este conjunto sempre



terá  $2 \cdot N_{\text{ant}}$  elementos, dos quais, metade estão próximos do real valor de  $\theta_{\text{AoA}}$  e os demais são valores distintos do objetivo e entre si.

$$\theta_{\pm k} = \alpha_k \pm \beta_{\pm k} \quad (22)$$

$$\Theta = \{\theta_{\pm k} \mid \forall k\} \quad (23)$$

Com os possíveis valores de  $\theta_{\text{AoA}}$  obtidos, é necessário estimar qual o valor correto. Para isso, é criada uma lista auxiliar  $\Theta_{[\bullet]}$ , quantizando os valores de  $\Theta$  em intervalos de tamanho  $\delta$ , descrito na Equação 24. A Equação 25 descreve a operação de quantização dos valores de  $\Theta$ , que, por se tratar de um cálculo auxiliar, utiliza-se o arredondamento para o inteiro mais próximo. A quantização implica que os valores de  $\Theta$  serão agrupados por faixas de largura  $\delta$ .

$$\delta = \frac{\pi}{2 \cdot (1 + N_{\text{ant}})} \quad (24)$$

$$\Theta_{[\bullet]} = \left\{ \left\lfloor \frac{\theta}{\delta} \right\rfloor \cdot \delta \mid \forall \theta \in \Theta \right\} \quad (25)$$

Salvo casos com muito ruído, espera-se que alguns valores em  $\Theta_{[\bullet]}$  se repitam, partindo disso, calcula-se  $\theta_{\mathcal{M}_o}$ , a moda estatística destes valores, conforme Equação 26. Esse valor deverá estar próximo ao  $\theta_{\text{AoA}}$ , e será utilizado na filtragem dos valores aferidos em  $\Theta$ .

$$\theta_{\mathcal{M}_o} = \mathcal{M}_o(\Theta_{[\bullet]}) \quad (26)$$

O conjunto  $\Theta_F$  contém itens de  $\Theta$  que estejam ao redor do valor  $\theta_{\mathcal{M}_o}$  calculado, num intervalo de  $\delta$  para mais ou para menos, conforme Equação 27.

$$\Theta_F = \{\theta \in \Theta \mid \theta_{\mathcal{M}_o} - \delta \leq \theta \leq \theta_{\mathcal{M}_o} + \delta\} \quad (27)$$

Finalmente obtém-se o valor de  $\theta_{\text{AoA}}$  pela mediana dos valores em  $\Theta_F$ , conforme Equação 28.

$$\theta_{\text{AoA}} = \widetilde{\Theta_F} \quad (28)$$

## 2.2 Trabalhos relacionados

Em seu trabalho, Horst [12] analisa dois algoritmos de detecção de AoA, realizando as análises em ambientes internos e utilizando matrizes de antenas. O primeiro método analisado consiste em uma aproximação do ângulo, feita utilizando um *software* fornecido pela Texas Instruments, fabricante do *hardware* utilizado. Já o segundo método, baseia-se na construção matemática do AoA calculado pela diferença de fase instantânea do sinal entre as antenas do sistema, uma abordagem semelhante à proposta neste trabalho. Os resultados obtidos indicam que o método de aproximação teve melhor acurácia nos valores de ângulo.

A proposta de Zeaiter *et al.* [15] busca validar a performance da detecção de AoA em ambiente fechado, realizando a análise em diferentes modulações, larguras de canal e fatores de espalhamento. Também propõe que, ao combinar de seu algoritmo de localização de AoA com a função de autocorrelação, é possível analisar os dados de dois sinais recebidos simultaneamente.

Outro trabalho de Zeaiter *et al.* [16] consiste em uma aproximação do AoA utilizando um método de autocorrelação em um sinal *Long Range* (LoRa) de baixa potência. Seu objetivo consiste em detectar o sinal LoRa operando em transmissão de baixa potência, caso onde a vida útil da bateria do sistema transmissor é estendida. O algoritmo apresentado busca picos de autocorrelação no sinal recebido, além de utilizar Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT) para denotá-los e melhorar a Relação Sinal-Ruído (*Signal-Noise Ratio*, SNR). Quando um pico é detectado, o algoritmo é capaz de encontrar o AoA.

BniLam *et al.* [17] propõe uma técnica que, sem qualquer informação prévia de largura de banda, consegue estimar AoA do sinal recebido. O sistema proposto consiste em uma Matriz Circular Uniforme (*Uniform Circular Array*, UCA) seguida de um filtro transversal, também utiliza de vetores especiais de largura de banda variável junto com um estimador de relação sinal-ruído térmico para determinar simultaneamente AoA e largura de banda do sinal recebido.

Em outro trabalho, BniLam *et al.* [18] estudam a possibilidade de estimar AoA para transceptores de Internet das Coisas (*Internet of Things*, IoT) em ambiente interno. Também propõe um modelo probabilístico adaptativo que opera no modelo de estimativa de AoA, incrementando sua performance. Seus resultados indicam que estes métodos superam a performance de modelos probabilísticos estáticos tradicionais, tanto em acurácia de localização quanto em estabilidade no valor obtido.

Neste trabalho, BniLam *et al.* [19] propõe um dispositivo de baixo custo capaz de estimar o AoA, de forma que seja viável sua utilização em dispositivos de IoT. O dispositivo consiste em uma conversão de vários Rádio Definido por *Software* (*Software-Defined Radio*, SDR) individuais de baixo custo num único SDR com múltiplos canais de RF. Seus resultados experimentais indicam que o dispositivo é capaz de estimar valores de AoA de forma estável e acurada.

A proposta de BniLam *et al.* [20] neste trabalho consiste em um novo algoritmo para

determinação de AoA chamado ANGLE (*ANGular Location Estimation*), baseado em modelos probabilísticos para a resposta do sinal recebido. Sua proposta ainda sugere duas versões do método, para o caso de amostragem única e de decomposição de subespaço, como utilizado no algoritmo MUSIC (*MUltiple Signal Classification*).

BniLam *et al.* [21] apresenta, neste trabalho, uma abordagem mais amigável para estimativa de AoA em redes LoRa. O sistema proposto, denominado LoRay (LoRa array) é composto por *hardware* e *software* preparados para fazer a estimativa de AoA em ambiente urbano, onde o sistema foi validado. O hardware utilizado foi descrito em um trabalho anterior [19]. Este sistema apresentou resultados estáveis e acurados para estimativa de AoA tanto nos casos Linha de visão (*Line of Sight*, LoS) quanto nos Sem Linha de visão (*Non Line of Sight*, NLoS).

Em seu trabalho, Niculescu e Nath [22] propõe métodos para detecção de posição e orientação em cada nó de uma rede *ad hoc*. A proposta parte de possíveis problemas relacionados à utilização de GPS em ambiente fechado

## 3 Metodologia

Neste capítulo, são explorados os métodos utilizados para a construção do trabalho proposto.

### 3.1 Simulação

A construção da simulação partiu de uma abordagem físico-matemática, definindo o sinal  $w$  como uma função de onda relativa ao tempo e ao espaço, analisando seus valores incidindo em cada antena  $A_k$  e comparando as defasagens  $\Delta\Phi_k$  entre os diferentes pares de antenas. Para simplificar a construção da simulação, foram utilizadas funções paramétricas, descritas na presente seção.

#### 3.1.1 Parâmetros envolvidos

Com o objetivo de garantir a coerência entre as partes da simulação, vários parâmetros foram utilizados, definindo detalhes em relação às operações matemáticas e às formas de registro dos valores calculados. Estes parâmetros são divididos entre os que recebem valores numéricos, booleanos ou matrizes numéricas.

Os parâmetros numéricos são:

- **amp\_w**, amplitude desejada para o sinal;
- **ang\_w**, direção do emissor do sinal, equivalente ao ângulo  $\theta_{AoA}$  de chegada do sinal em relação à malha de antenas;
- **angle\_Z\_A\_x\_B**, ângulo relativo  $\beta_{\pm k}$  para par de antenas;
- **d**, distância  $d$  entre par de antenas da malha;
- **choose\_angle**, ângulo  $\theta_{AoA}$  final calculado pelo sistema;
- **interval**, indica os limites para a geração de imagem da simulação;
- **lambda\_w**, comprimento de onda  $\lambda$ ;
- **N\_antenas**, quantidade  $N_{ant}$  de antenas da malha;
- **omega\_w**, frequência angular  $\omega$ ;
- **phase\_w**, fase  $\phi$  do sinal no emissor;
- **Rho**, raio  $\rho$  do polígono que dispõe as antenas na malha;
- **r\_w**, distância que o emissor de sinal está da coordenada  $(0, 0)$  do sistema;

- `range_step`, largura em graus do passo na simulação.
- `resolution`, relativo à quantidade de pontos utilizados na aproximação numérica do cálculo de correlação;
- `SNR`, valor da SNR linear;
- `SNR_dB`, valor da SNR em dB;
- `t_w`, tempo  $t$  associado ao instante de aferição do sinal;
- `x_w` ou `y_w`, coordenada  $x_{A_k}$  ou  $y_{A_k}$  da antena  $A_k$  em relação ao sistema;
- `Z_antenna`, `Z_antenna_A` ou `Z_antenna_B`, valor complexo, coordenada de antena;
- `Z_phase_A` ou `Z_phase_B`, valor complexo, fase  $\Phi_k$  de antena;

Os parâmetros booleanos são:

- `ATT`, indica se o sinal contará com atenuação por distância;
- `C`, indica a utilização de componente cossenoidal na construção do sinal;
- `CHG_PHI`, indica se a fase geral do sinal deve mudar ao longo da simulação;
- `CHG_R`, indica se a distância do emissor do sinal deverá mudar ao longo da simulação;
- `CHG_THETA`, indica se o ângulo de origem do sinal deverá mudar ao longo da simulação;
- `NOISE`, indica se o sinal contará com ruído;
- `S`, indica a utilização de componente senoidal na construção do sinal;
- `S_DAT`, indica se os pontos gerados pela simulação deverão ser salvos;
- `S_GIF`, indica se a imagem gerada pela simulação deverá ser salva;

Os parâmetros de matrizes numéricas são:

- `ant_array`, coordenadas das antenas da malha;
- `delta_A_x_B_array`, contendo o ângulo  $\theta_{\pm k}$  calculado por  $\alpha_k + \beta_{\pm k}$  aferido para cada par de antenas da malha;
- `delta_B_x_A_array`, contendo o ângulo  $\theta_{\pm k}$  calculado por  $\alpha_k - \beta_{\pm k}$  aferido para cada par de antenas da malha;
- `Z_phase_array`, matriz de valores numéricos complexos, contendo o sinal complexo aferido para cada antena da malha;
- `z_plot`, estado corrente do sinal no espaço, utilizado na geração de imagem da simulação;
- `Z_x_array`, valores complexos, contendo a defasagem  $\Delta\Phi_k$  aferido para cada par de antenas na malha;

### 3.1.2 Funções auxiliares

A primeira função a ser definida é `argument_r`, que opera como auxiliar para normalização de argumento para as funções trigonométricas utilizadas nas análises, garantindo coerência em frequência angular e coordenadas espaciais. Seus argumentos são, respectivamente, `x_w`, `y_w`, `t_w`, `ang_w`, `r_w`, `lambda_w` e `omega_w`. O Código 1 apresenta uma versão simplificada da função `argument_r` desenvolvida.

Código 1: Função `argument_r`, simplificada.

```
1 function res = argument_r(...)
2     r = r_w * lambda_w;
3
4     x_0 = r * cos(ang_w);
5     y_0 = r * sin(ang_w);
6
7     res = (2*pi/lambda_w) * ( sqrt((y_w-y_0).^2 + ...
8         (x_w-x_0).^2) ) + omega_w*t_w + phase_w;
9 end %function
```

Fonte: Autor.

Para determinar a fase do sinal  $w$ , incidente em cada antena  $A_k$ , calcula-se a correlação deste sinal com sinais de referência seno e cossenos, fornecidos respectivamente pelas funções `ref_sin` e `ref_cos`. As duas funções recebem os mesmos argumentos, e estes são, respectivamente, `t_w` e `omega_w`. Ambos os casos utilizam a função `argument_r` para garantir coerência de frequência com o sinal incidente. Os Códigos 2 e 3 apresentam, respectivamente, versões simplificadas das funções `ref_cos` e `ref_sin` desenvolvidas.

Código 2: Função `ref_cos`, simplificada.

```
1 function c = ref_cos(...)
2     c = cos(argument_r(0, 0, t_w, 0, 0, 1, omega_w, 0));
3 end %function
```

Fonte: Autor.

Código 3: Função `ref_sin`, simplificada.

```
1 function s = ref_sin(...)
2     s = sin(argument_r(0, 0, t_w, 0, 0, 1, omega_w, 0));
3 end %function
```

Fonte: Autor.

A próxima função construída foi `signal_r`, que calcula o valor do sinal  $w$  numa coordenada  $(x, y)$  e um instante  $t$ . Considera-se que o sinal é composto pela soma de seno e cosseno, e que são determinadas a distância e a direção de sua fonte emissora. Também é possível definir amplitude e fase na origem, além da presença de atenuação

e ruído do tipo AWGN. Seus argumentos são, respectivamente, `x_w`, `y_w`, `t_w`, `amp_w`, `ang_w`, `r_w`, `phase_w`, `lambda_w`, `omega_w`, `S`, `C`, `NOISE`, `SNR_dB` e `ATT`. É utilizada a função `argument_r` para garantir coerência de frequência entre as componentes e com os sinais de referência utilizados no cálculo de correlação. Para implementação do ruído, foi utilizada a função `awgn`, no GNU Octave, é necessária a biblioteca *communications*, porém para o MATLAB, não é necessário carregar bibliotecas [23, 24]. O Código 4 apresenta uma versão simplificada da função `signal_r` desenvolvida.

Código 4: Função `signal_r`, simplificada.

```

1 function res = signal_r(...)
2     res = 0;
3     if S
4         res = res + sin( argument_r(...) );
5     end %if
6     if C
7         res = res + cos( argument_r(...) );
8     end %if
9     if S && C
10        res = res / sqrt(2);
11    end %if
12    if ATT
13        %%% Lei de Friis
14        G_t = 1; % Ganho Antena Tx
15        G_r = 1; % Ganho Antena Rx
16        R_t = 1; % Distância do emissor
17        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
18        P_t = (amp_w^2)/R_t;
19        P_r = P_t * G_t * G_r * (lambda_w / (4 * pi * r_w));
20        amp_r = sqrt(P_r * R_t);
21        res = res * amp_r;
22    else
23        res = res * amp_w;
24    end %if
25    if NOISE
26        res = awgn(res, SNR_dB, 'measured');
27    end %if
28 end %function

```

Fonte: Autor.

A última função auxiliar desenvolvida foi `is octave`, que confere se a corrente simulação está sendo executada no GNU Octave, retornando um valor binário e não recebe qualquer parâmetro. O Código 5 apresenta uma versão simplificada da função `is octave` desenvolvida.

Código 5: Função `is octave`, simplificada.

```

1 function r = is octave ()
2     persistent x;
3     if ( isempty (x))
4         x = exist ('OCTAVE_VERSION', 'builtin');
5     end
6     r = x;
7 end

```

Fonte: Autor.

### 3.1.3 Função de cálculo para AoA

A primeira grande função desenvolvida foi `calc_AoA`, que é responsável pelo cálculo geral da simulação. Inicialmente são calculadas as coordenadas das  $N_{\text{ant}}$  antenas e, em sequência, os valores de fase do sinal incidente  $w$  em cada antena  $A_k$ , então as defasagens entre os pares de antenas e finalmente a seleção do valor mais provável para  $\theta_{\text{AoA}}$ . Seus argumentos são, respectivamente, `amp_w`, `ang_w`, `r_w`, `phase_w`, `lambda_w`, `omega_w`, `S`, `C`, `NOISE`, `SNR_dB`, `ATT`, `resolution`, `d` e `N_antenas`. Nessa função também são definidas três subfunções auxiliares `phase_z`, `dephase_A_to_B` e `deltas_A_B`. O Código 6 apresenta uma versão simplificada da função `calc_AoA` desenvolvida.

A subfunção `phase_z` calcula o valor complexo de fase  $Z_K$  para a antena  $A_k$  através da correlação pelos sinais de seno e cosseno. Seus argumentos são, respectivamente, `t`, `Z_antenna`, `amp_w`, `ang_w`, `r_w`, `phase_w`, `lambda_w`, `omega_w`, `S`, `C`, `NOISE`, `SNR_dB` e `ATT`. O Código 7 apresenta uma versão simplificada da função `phase_z` desenvolvida.

A subfunção `dephase_A_to_B` calcula o valor complexo de defasagem  $\Delta\Phi_k$ , o ângulo relativo  $\beta_{\pm k}$  e o ângulo  $\alpha_k$  entre um par de antenas. Seus argumentos são, respectivamente, `Z_phase_A` e `Z_phase_B`. O Código 8 apresenta uma versão simplificada da função `dephase_A_to_B` desenvolvida.

E a subfunção `deltas_A_B` calcula os ângulos  $\theta_{\pm k}$  para um par de antenas. Seus argumentos são, respectivamente, `angle_Z_A_x_B`, `Z_antenna_A` e `Z_antenna_B`. O Código 9 apresenta uma versão simplificada da função `deltas_A_B` desenvolvida.

### 3.1.4 Função de geração saída visual

A segunda grande função desenvolvida foi `generate_fig`, que constrói a animação de saída da simulação, formada por dois gráficos. O primeiro gráfico, à esquerda nas animações geradas, apresenta a disposição das antenas, os valores de fase para cada uma delas, os valores de defasagem entre os pares de antenas, todos os possíveis valores de  $\theta_{\pm k}$ , e finalmente o valor real e o escolhido para  $\theta_{\text{AoA}}$ . O segundo gráfico, à direita nas animações geradas, apresenta a disposição das antenas e uma representação do sinal  $w$  no espaço exibido. Os valores exibidos são calculados pela função `calc_AoA`. Seus argumentos são, respectivamente, `z_plot`, `x_w`, `y_w`, `ang_w`, `lambda_w`, `interval`, `Rho`, `choose_angle`, `ant_array`, `Z_phase_array`, `Z_x_array`, `delta_A_x_B_array` e `delta_B_x_A_array`. A



Código 6: Função `calc_AoA`, simplificada.

```

1 function return_struct = calc_AoA(...)
2   Rho = d/(2*sin(pi / N_antenas));
3   ant_angles = % ...
4   ant_array = Rho * exp(i * deg2rad(ant_angles));
5
6   Z_phase_array = arrayfun(@(a) phase_z(...), ant_array);
7   [Z_x_array angle_Z_A_x_B_array] = arrayfun( ...
8     @(a, b) dephase_A_to_B(a, b), ... );
9
10  [delta_A_x_B delta_B_x_A] = arrayfun( ...
11    @(ang, a, b) deltas_A_B(ang, a, b), ... );
12
13  range_angle = pi/(2*(N_antenas+1));
14
15  angle_vector = [delta_A_x_B delta_B_x_A];
16  angle_vector = [...]; % Normalização
17
18  angle_vector_round = ...
19    round(angle_vector./range_angle).*range_angle;
20
21  target_angle = mode(angle_vector_round);
22
23  angle_vector = angle_vector(abs(target_angle ...
24    - angle_vector) <= range_angle );
25
26  choose_angle = median(angle_vector);
27
28  return_struct = { ...
29    choose_angle ...
30    Rho ...
31    ant_array ...
32    Z_phase_array ...
33    Z_x_array ...
34    delta_A_x_B ...
35    delta_B_x_A ...
36  };
37
38 end %function

```

Fonte: Autor.

Código 7: Função `phase_z`, simplificada.

```

1 function Z_phase = phase_z(...)
2   I_medido = trapz(t, ref_cos(...) .* signal_r(...) );
3   Q_medido = trapz(t, ref_sin(...) .* signal_r(...) );
4
5   Z_phase = (omega_w/pi)*(I_medido + i*Q_medido);
6 end % function

```

Fonte: Autor.

Código 8: Função `dephase_A_to_B`, simplificada.

```
1 function [Z_phase_A_x_B angle_Z_A_x_B] = dephase_A_to_B(...)
2     Z_phase_A_x_B = Z_phase_A * conj(Z_phase_B);
3     deltaPhi_A_x_B = angle(Z_phase_A_x_B);
4     angle_Z_A_x_B = acos(deltaPhi_A_x_B/(pi));
5 end % function
```

Fonte: Autor.

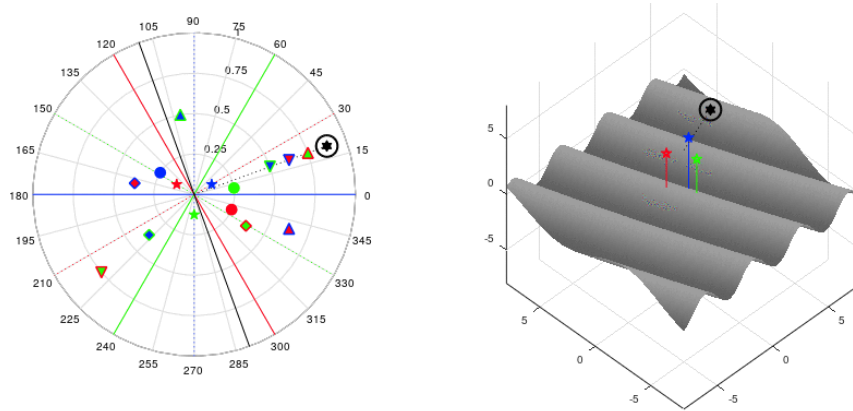
Código 9: Função `deltas_A_B`, simplificada.

```
1 function [delta_A_x_B delta_B_x_A] = deltas_A_B(...)
2     ang_A_x_B = deg2rad(mod(rad2deg(...
3         angle(Z_antenna_A - Z_antenna_B)),360));
4     delta_A_x_B = ang_A_x_B + angle_Z_A_x_B;
5     delta_B_x_A = ang_A_x_B - angle_Z_A_x_B;
6 end % function
```

Fonte: Autor.

Figura 9 ilustra os gráficos gerados pela função `generate_fig`.

Figura 9: Exemplo de quadro da animação de saída da função `generate_fig`.



Fonte: Autor.

### 3.1.5 Função geral da simulação

Finalmente a função responsável por juntar todas as partes é `w_xyt`, a base para a simulação, ela invoca as funções `calc_AoA` e `generate_fig` com os devidos parâmetros, além de garantir que os arquivos gerados sejam salvos corretamente. Seus argumentos são, respectivamente, `NOISE`, `ATT`, `CHG_PHI`, `CHG_R`, `CHG_THETA`, `S_GIF`, `S_DAT`, `SNR`, `range_step` e `N_antenas`.

## 4 Resultados

Neste capítulo são apresentados resultados e detalhes sobre a performance do sistema proposto, comparando a acurácia para diferentes configurações. Também são apontados problemas encontrados ao longo do desenvolvimento do trabalho.

### 4.1 Performance da simulação

Foram analisadas diferentes quantidades de antenas, contando ou não com ruído e atenuação no sinal. Para todas as quantidades de antenas analisadas, são sumarizadas simulações com e sem Atenuação (ATT), diferentes valores de SNR, partindo do caso de ruído ideal (sem qualquer ruído,  $\text{SNR} \rightarrow \infty$  dB) ao caso de potência de ruído igual à potência de sinal ( $\text{SNR} = 0$  dB), com o emissor do sinal circular orbitando a uma distância fixa de  $50\lambda$  do centro do sistema de antenas.

Para garantir a robustez do sistema, foram realizadas outras simulações, considerando casos onde o emissor está se aproximando do sistema de antenas e também casos onde o emissor está estático no espaço. Estas simulações não foram sumarizadas.

#### 4.1.1 Três antenas

As simulações com três antenas foram as que apresentaram menores valores de  $R^2$  dentre as analisadas. Apesar disso, todos os valores foram acima de 75 %.

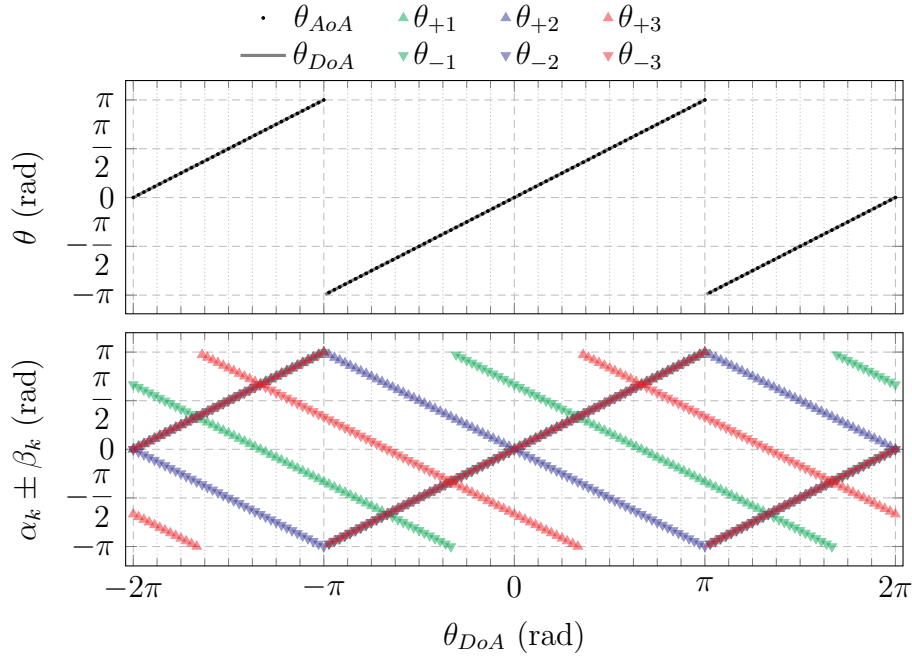
Simulações realizadas na configurações de três antenas têm os valores de  $R^2$  apresentados na Tabela 1, e os resultados dos valores destacados são apresentados nas Figuras 10, 11 e 12.

Tabela 1: Valores de  $R^2$  para simulações notáveis com três antenas.

SNR (dB)	$R^2$ sem ATT (%)	$R^2$ com ATT (%)
$\infty$	<b>100,00</b>	100,00
20	88,06	90,45
17	88,18	87,98
14	99,99	84,49
7	90,12	83,50
0	<b>76,32</b>	<b>78,73</b>

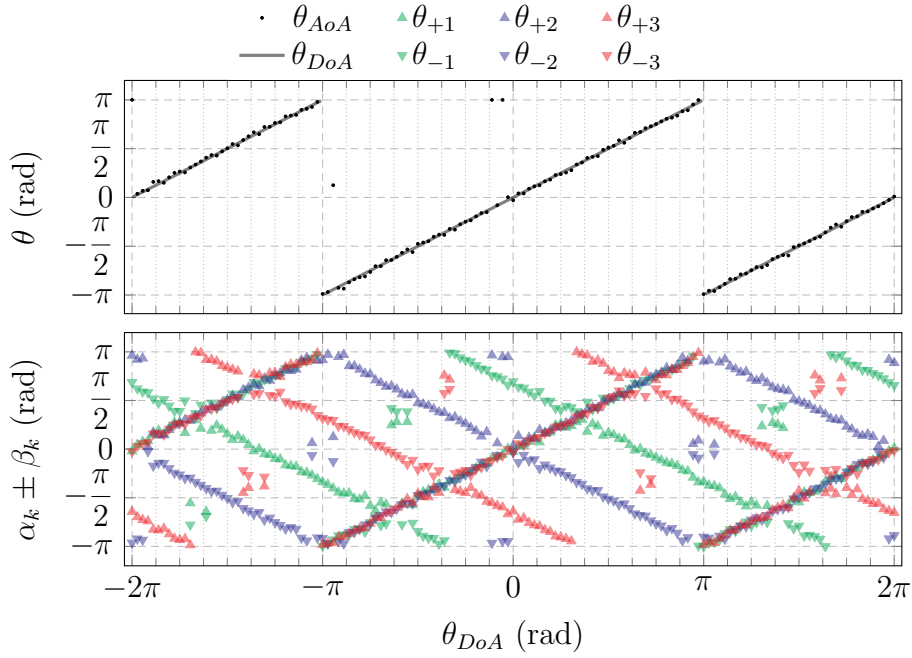
Fonte: Autor.

Figura 10: Simulação para três antenas, caso ideal ( $\text{SNR} \rightarrow \infty$  dB).



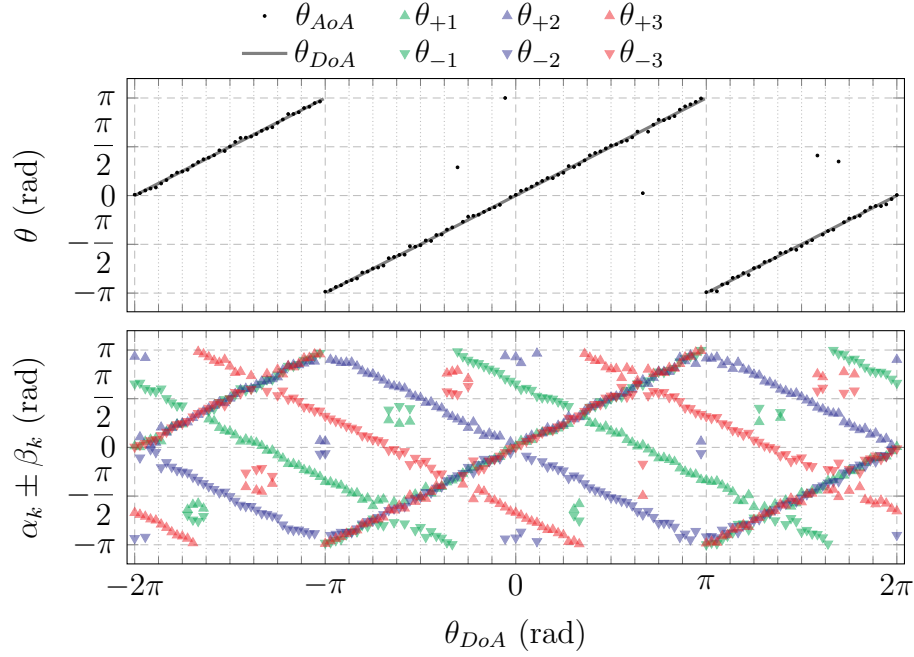
Fonte: Autor.

Figura 11: Simulação para três antenas, caso  $\text{SNR} = 0$  dB, sem atenuação.



Fonte: Autor.

Figura 12: Simulação para três antenas, caso SNR = 0 dB, com atenuação.



Fonte: Autor.

#### 4.1.2 Cinco antenas

As simulações com cinco antenas apresentaram valores intermediários de  $R^2$ . Todos os valores foram acima de 80 %.

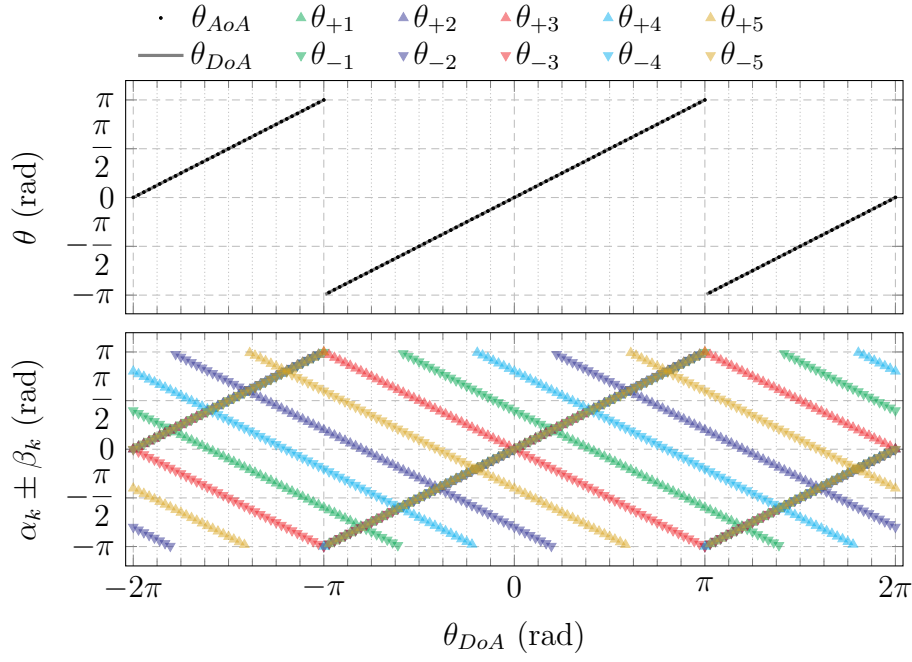
Simulações realizadas na configurações de cinco antenas têm os valores de  $R^2$  apresentados na Tabela 2, e os resultados dos valores destacados são apresentados nas Figuras 13, 14 e 15.

Tabela 2: Valores de  $R^2$  para simulações notáveis com cinco antenas.

SNR (dB)	$R^2$ sem ATT (%)	$R^2$ com ATT (%)
$\infty$	<b>100,00</b>	100,00
20	100,00	100,00
17	91,90	91,89
14	91,91	91,90
7	84,27	91,93
0	<b>80,73</b>	<b>96,28</b>

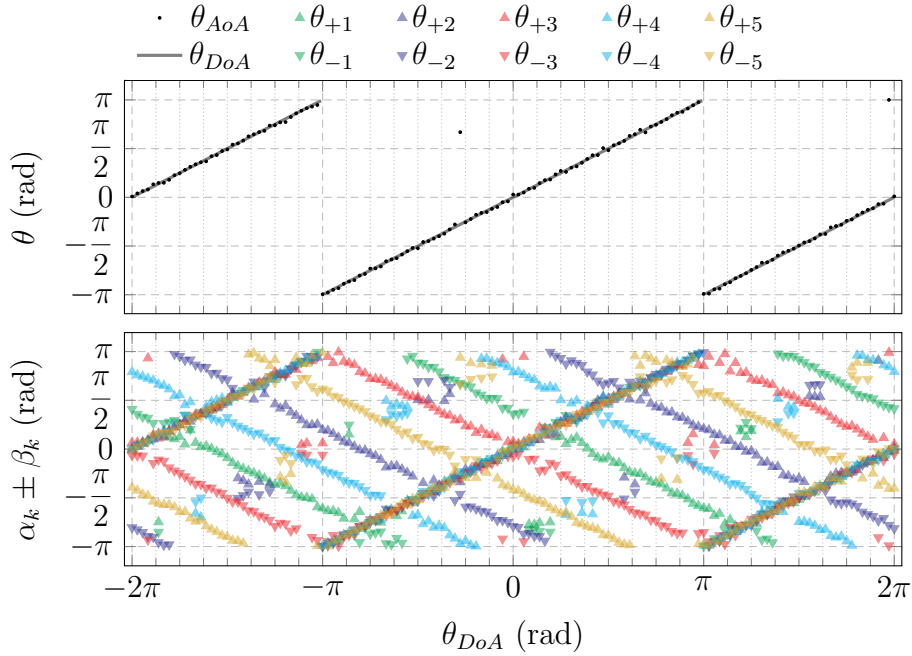
Fonte: Autor.

Figura 13: Simulação para cinco antenas, caso ideal ( $\text{SNR} \rightarrow \infty$  dB).



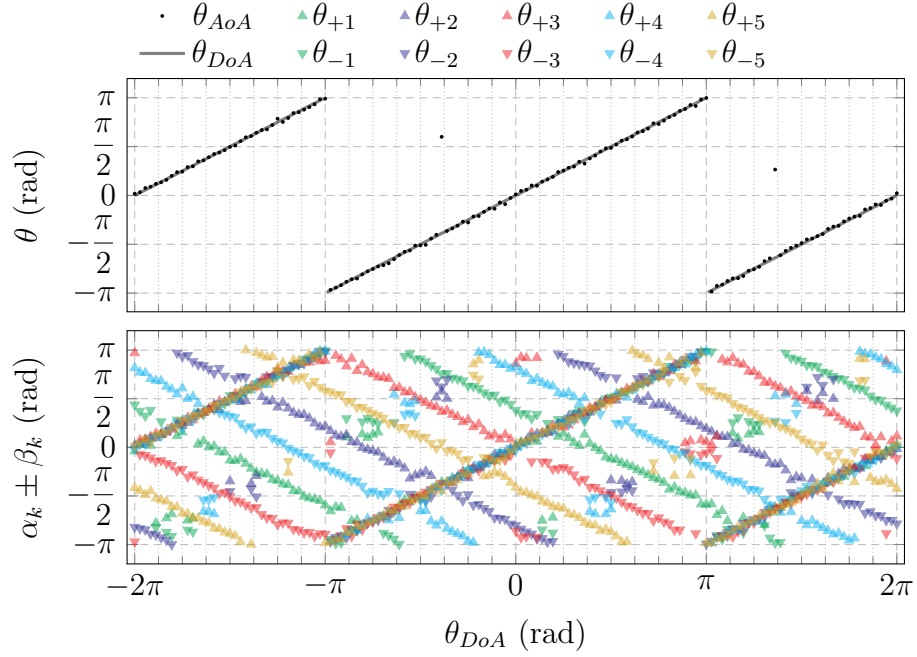
Fonte: Autor.

Figura 14: Simulação para cinco antenas, caso  $\text{SNR} = 0$  dB, sem atenuação.



Fonte: Autor.

Figura 15: Simulação para cinco antenas, caso  $\text{SNR} = 0 \text{ dB}$ , com atenuação.



Fonte: Autor.

#### 4.1.3 Sete antenas

As simulações com sete antenas apresentaram os melhores valores de  $R^2$ , com casos acima de 99%. Todos os valores foram acima de 80%.

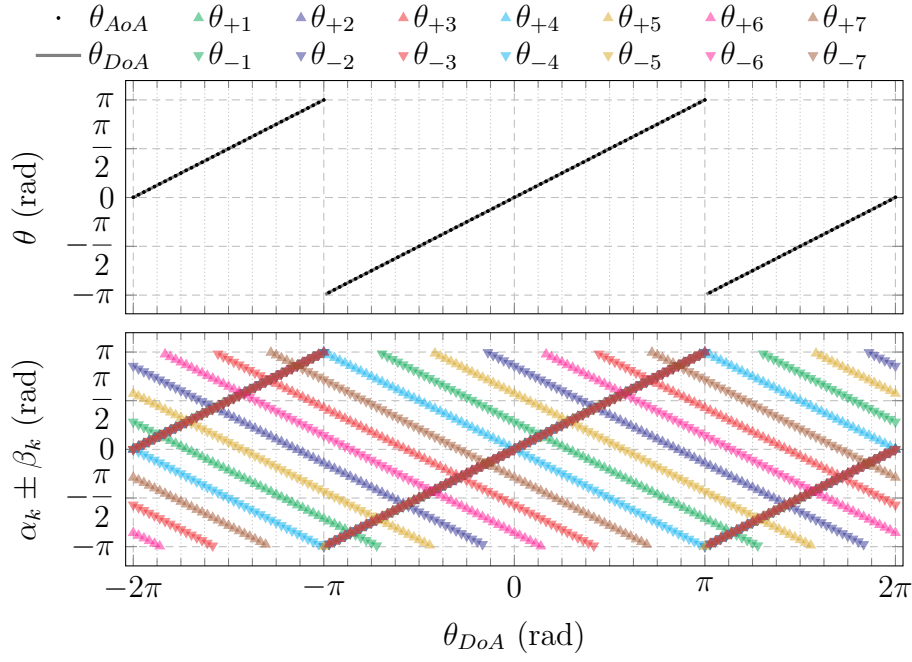
Simulações realizadas na configurações de sete antenas têm os valores de  $R^2$  apresentados na Tabela 3, e os resultados dos valores destacados são apresentados nas Figuras 16, 17 e 18.

Tabela 3: Valores de  $R^2$  para simulações notáveis com sete antenas.

SNR (dB)	$R^2$ sem ATT (%)	$R^2$ com ATT (%)
$\infty$	<b>100,00</b>	100,00
20	84,25	100,00
17	100,00	84,24
14	91,90	100,00
7	99,99	84,28
0	<b>80,15</b>	<b>99,98</b>

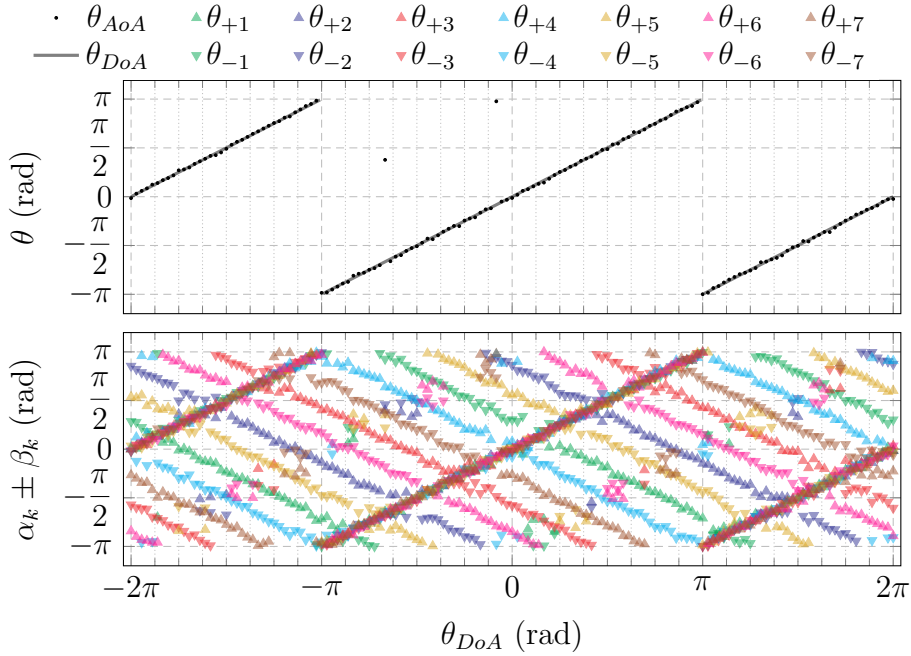
Fonte: Autor.

Figura 16: Simulação para sete antenas, caso ideal ( $\text{SNR} \rightarrow \infty$  dB).



Fonte: Autor.

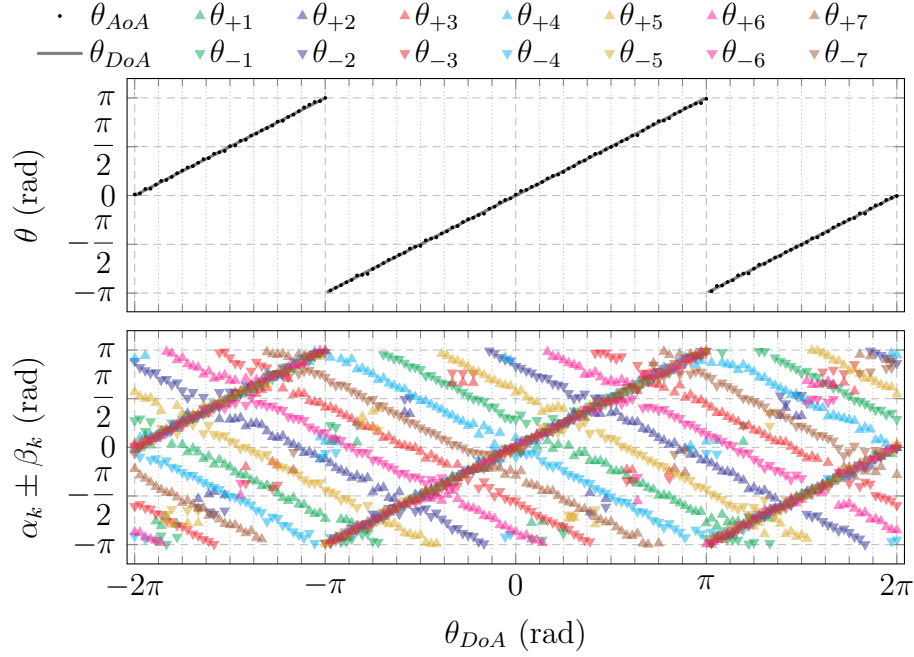
Figura 17: Simulação para sete antenas, caso  $\text{SNR} = 0$  dB, sem atenuação.



Fonte: Autor.



Figura 18: Simulação para sete antenas, caso SNR = 0 dB, com atenuação.



Fonte: Autor.

## 4.2 Problemas encontrados

Ao longo do desenvolvimento do projeto, alguns problemas foram encontrados e contornados da melhor forma possível. Esta seção sumariza estes problemas e as soluções aplicadas.

### 4.2.1 Compatibilidade de código

Apesar de ter sido desenvolvido para o GNU Octave, houve a preocupação de manter o código compatível com o MATLAB. Partindo disso, foram necessárias várias alterações em partes do código, que não tinham o mesmo comportamento em ambos os *softwares*.

### 4.2.2 Limitações de *software* livre

Por se tratar de um *software* proprietário, o MATLAB não disponibiliza o código fonte de todas as suas ferramentas internas e, assim, nem todas as funcionalidades estão implementadas no GNU Octave. A falta de algumas dessas funções moldou o decorrer do desenvolvimento do projeto, optando por operações viáveis à versão de uso livre.

## 5 Conclusão

Foguetes de sondagem atmosférica podem pousar em qualquer lugar dentro do raio de alcance do voo, e recuperá-los pode ser inviável sem uma estratégia de localização eficaz. Uma estratégia muito utilizada é a localização por GNSS, por exemplo, o GPS, contudo, esta ainda depende que a equipe de busca tenha acesso às próprias coordenadas geográficas e comunicação efetiva com o sistema embarcado do foguete.

O presente trabalho propõe a utilização de um sistema de localização baseada no sinal RF emitido pelo veículo, e não pela informação contida nesse sinal, analisando as diferenças de defasagem do sinal incidente em uma malha de antenas, e assim calculando o AoA deste sinal.

Durante a revisão bibliográfica, fundamentou-se a teoria aplicada nessa proposta. Partindo de uma abordagem físico-matemática para analisar o sinal e a forma que a defasagem entre antenas pode ser utilizada para calcular a direção do emissor. Também foram listadas algumas propostas que atuam de forma semelhante, analisando o sinal incidente em uma malha de antenas, que demonstra a relevância do método. Além disso, foi realizado um breve levantamento sobre o método de direcionamento por coordenadas geográficas e o ângulo de *bearing*, que guia uma equipe de busca ao veículo almejado.

Com base na fundamentação físico-matemática, foi desenvolvida uma simulação com o sinal de RF incidente em uma malha de antenas. Considerando que o foguete esteja em solo, assumiu-se um espaço de duas dimensões, porém ainda mantendo a possibilidade do veículo, emissor do sinal, se mover livremente em relação ao sistema de antenas. As simulações foram construídas a partir dessas possibilidades, com o veículo circulando o sistema de antenas e se aproximando.

As simulações realizadas utilizaram geometrias de três, cinco e sete antenas. A escolha dessas quantidades deu-se por questões geométricas, pois polígonos regulares com uma contagem par de lados terão lados paralelos, enquanto polígonos de lados ímpares não apresentam essa propriedade. Os valores de  $R^2$  para as configurações simuladas foram todos acima de 75 %, o que indica grande acurácia na modelagem proposta. A comparação entre as geometrias estudadas indicou que o sistema com três antenas teve uma acurácia média menor que as geometrias com mais antenas.

As limitações impostas pelo uso de *software* livre fizeram com que fossem utilizados métodos diferentes dos levantados na revisão bibliográfica, porém o método estatístico proposto se mostrou eficaz nos testes realizados. Outra limitação foi relacionada à compatibilidade do código escrito, já que a sintaxe e algumas funções do MATLAB têm algumas diferenças em relação às equivalentes do GNU Octave.

Em conclusão, o trabalho aqui proposto se mostrou eficaz na determinação do AoA para um sinal incidente em uma malha de antenas, garantindo um valor de  $R^2$  acima de 75 % em todos os casos e valor médio de  $R^2$  acima de 92 %.

Para trabalhos futuros, é possível analisar outras disposições de antenas na malha.

Apesar da formulação atual optar por polígonos regulares por simplicidade, a matemática utilizada calcula os ângulos de cada par de antenas individualmente, o que viabiliza outras disposições de antenas, que respeitem a distância entre antenas de um par. Outras possibilidades englobam analisar mais classes de ruídos e até problemas de propagação multicaminho. Além disso, a construção de um dispositivo eletrônico capaz de realizar a aferição de fase em uma malha de antenas poderá corroborar no levantamento de outros problemas a serem analisados e também validar a presente proposta.

## Referências

- [1] ISRO, Indian Space Research Organisation, Departament of Space, *Sounding Rockets*. endereço: <https://www.isro.gov.in/soundingRockets.html>.
- [2] ESA, European Space Agency, *Sounding rockets*. endereço: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Human\\_and\\_Robotic\\_Exploration/Research/Sounding-rockets](https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Research/Sounding-rockets).
- [3] M. Sabbatini e N. Sentse, “ESA User Guide to Low Gravity Platforms”, *Directorate of Human Spaceflight and Operations*,, 2014. endereço: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Human\\_and\\_Robotic\\_Exploration/Research/European\\_user\\_guide\\_to\\_low-gravity\\_platforms](https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Research/European_user_guide_to_low-gravity_platforms).
- [4] NASA, National Aeronautics and Space Administration, *About Sounding Rockets*. endereço: <https://www.nasa.gov/soundingrockets/overview/>.
- [5] ESRA, Experimental Sounding Rocket Association, *The Intercollegiate Rocket Engineering Competition*. endereço: <https://www.soundingrocket.org/what-is-irec.html>.
- [6] ESRA, Experimental Sounding Rocket Association, *Spaceport America Cup Intercollegiate Rocket Engineering Competition Rules & Requirements Document*. endereço: [https://www.soundingrocket.org/uploads/9/0/6/4/9064598/sa\\_cup\\_irec\\_rules\\_and\\_requirements\\_document-2023\\_v1.3\\_20231001.pdf](https://www.soundingrocket.org/uploads/9/0/6/4/9064598/sa_cup_irec_rules_and_requirements_document-2023_v1.3_20231001.pdf).
- [7] P. Guitarrara, *Coordenadas geográficas*. endereço: <https://brasilescola.uol.com.br/geografia/coordenadas-geograficas.htm>.
- [8] C. Veness, *Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points*. endereço: <https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>.
- [9] H. Fleming, *Coordenadas esféricas*, ago. de 2003. endereço: <http://fma.if.usp.br/~fleming/diffeo/node4.html>.
- [10] D. Jennings, R. Drullinger, K. Evenson, C. Pollock e J. Wells, “The continuity of the meter: the redefinition of the meter and the speed of visible light”, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, v. 92, n. 1, p. 11, 1987.
- [11] A. Bensky, *Wireless positioning technologies and applications*. Artech House, 2016. endereço: [https://scholar.rose-hulman.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1012&context=electrical\\_grad\\_theses](https://scholar.rose-hulman.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1012&context=electrical_grad_theses).
- [12] V. Horst, “Localization and Angle-of-Arrival in Bluetooth Low Energy”, 2021. endereço: <https://www.ds.informatik.uni-kiel.de/en/teaching/bachelor-and-master-theses/completed-master-and-bachelor-theses/2021%20bachelor%20thesis%20Valentin%20Horst.pdf>.

- [13] M. Schüssell, “Angle of Arrival Estimation using WiFi and Smartphones”, 2016. endereço: [https://ipin2016.web.uah.es/usb/app/descargas/223\\_WIP.pdf](https://ipin2016.web.uah.es/usb/app/descargas/223_WIP.pdf).
- [14] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. John Wiley & Sons, 2005.
- [15] H. Zeaiter, O. Baala, F. Spies e V. Thierry, “Performance Evaluation of the Angle of Arrival of LoRa Signals under Interference”, em *9th IEEE International Conference on Communications and Electronics (ICE 2022)*, IEEE, Nha Trang, Vietnam: IEEE, jul. de 2022. endereço: <https://ut3-toulouseinp.hal.science/hal-03693641>.
- [16] H. Zeaiter, F. Spies, O. Baala e T. Val, “Measuring accurate Angle of Arrival of weak LoRa signals for Indoor Positioning”, em *12th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2022)*, Beijing, China, set. de 2022. DOI: 10.1109/IPIN54987.2022.9918114. endereço: <https://hal.science/hal-03932846>.
- [17] N. BniLam, J. Steckel e M. Weyn, “2D angle of arrival estimations and bandwidth recognition for broadband signals”, em *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, IEEE, 2017, pp. 2041–2045. endereço: [https://www.researchgate.net/publication/317397561\\_2D\\_angle\\_of\\_arrival\\_estimations\\_and\\_bandwidth\\_recognition\\_for\\_broadband\\_signals](https://www.researchgate.net/publication/317397561_2D_angle_of_arrival_estimations_and_bandwidth_recognition_for_broadband_signals).
- [18] N. BniLam, G. Ergeerts, D. Subotic, J. Steckel e M. Weyn, “Adaptive probabilistic model using angle of arrival estimation for IoT indoor localization”, em *2017 International conference on indoor positioning and indoor navigation (IPIN)*, IEEE, set. de 2017, pp. 1–7.
- [19] N. BniLam, D. Joosens, J. Steckel e M. Weyn, “Low cost AoA unit for IoT applications”, em *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, IEEE, 2019, pp. 1–5. endereço: [https://www.researchgate.net/profile/Noori-Bnilam-2/publication/332141599\\_Low\\_Cost\\_AoA\\_Unit\\_for\\_IoT\\_Applications/links/5ca2ee8d299bf1116956bf0e/Low-Cost-AoA-Unit-for-IoT-Applications.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Noori-Bnilam-2/publication/332141599_Low_Cost_AoA_Unit_for_IoT_Applications/links/5ca2ee8d299bf1116956bf0e/Low-Cost-AoA-Unit-for-IoT-Applications.pdf).
- [20] N. BniLam, E. Tanghe, J. Steckel, W. Joseph e M. Weyn, “ANGLE: ANGular location estimation algorithms”, *IEEE access*, v. 8, pp. 14 620–14 629, 2020. endereço: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8959176>.
- [21] N. BniLam, T. Janssen, M. Aernouts, R. Berkvens e M. Weyn, “LoRa 2.4 GHz communication link and range”, *Sensors*, v. 20, n. 16, p. 4366, 2020.
- [22] D. Niculescu e B. Nath, “Ad hoc positioning system (APS) using AOA”, em *IEEE INFOCOM 2003. Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No.03CH37428)*, vol. 3, 2003, 1734–1743 vol.3. DOI: 10.1109/INFOCOM.2003.1209196.
- [23] Nir Krakauer, *Function Reference: awgn*, 2016. endereço: <https://octave.sourceforge.io/communications/function/awgn.html>.

- [24] The MathWorks, Inc., *awgn*, 2025. endereço: <https://www.mathworks.com/help/comm/ref/awgn.html>.

## A Códigos desenvolvidos para simulação

O sistema desenvolvido, os arquivos de saída das simulações citadas ao longo do documento e os arquivos-fonte deste relatório estão disponíveis [neste repositório no GitHub](#).

### A.1 Simulação de direcionamento GNSS

Código 10: Arquivo de código bearing.m.

```
1 EARTH_RADIUS = 6371E3;
2
3 % Lat Lon
4 coord_ufabc_SA = [-23.64450271006082 -46.52808340455618];
5 coord_ufabc_SBC = [-23.67751377362596
6 -46.563491717644425];
7
8 A = coord_ufabc_SA;
9 B = coord_ufabc_SBC;
10
11 theta_A = deg2rad(A(1));
12 theta_B = deg2rad(B(1));
13
14 phi_A = deg2rad(A(2));
15 phi_B = deg2rad(B(2));
16
17 delta_theta = theta_B - theta_A;
18 delta_phi = phi_B - phi_A;
19
20 X = cos(theta_B)*sin(delta_phi);
21 Y = cos(theta_A)*sin(theta_B) - sin(theta_A)*cos(theta_B)*
22 cos(delta_phi);
23 Z = (sin(delta_theta/2))^2 + cos(theta_B) * cos(theta_A) *
24 (sin(delta_phi/2))^2;
25
26 beta = atan2(X,Y) - pi/2;
27
28 if beta < -pi
29     beta = beta + 2*pi
30 end
31
32 d = EARTH_RADIUS * 2 * atan2(sqrt(Z), sqrt(1 - Z))
33
34 d_deg = rad2deg(beta)
```

## A.2 Simulação de AoA

### A.2.1 Funções auxiliares

Código 11: Arquivo de código `argument_r.m`.

```
1 function res = argument_r(x_w, y_w, t_w, ang_w, r_w,  
    lambda_w, omega_w, phase_w)  
2 % Argumento da funcao senoidal  
3 % x_w = coordenada x associada ao ponto da antena  
4 % y_w = coordenada y associada ao ponto da antena  
5 % t_w = tempo t associado ao instante de afericao do  
    sinal  
6 % ang_w = angulo theta de chegada do sinal em relacao ao  
    sistema de antenas  
7 % r_w = distância que o emissor de sinal está da  
    coordenada (0,0) do sistema  
8 % lambda_w = comprimento de onda  
9 % omega_w = frequencia angular  
10 % phase_w = defasagem do sinal no emissor  
  
11  
12 r = r_w * lambda_w;  
13  
14 x_0 = r * cos(ang_w);  
15 y_0 = r * sin(ang_w);  
16 % y_0 = r * 10;  
17  
18 res = (2*pi/lambda_w) * ( sqrt((y_w-y_0).^2 + (x_w-x_0)  
    .^2) ) + omega_w*t_w + phase_w;  
19 end %function
```

Código 12: Arquivo de código `ref_cos.m`.

```
1 function c = ref_cos(t_w, omega_w)  
2 % funcao auxiliar de sinal cosseno  
3 c = cos(argument_r(0, 0, t_w, 0, 0, 1, omega_w, 0));  
4 end %function
```

Código 13: Arquivo de código `ref_sin.m`.

```
1 function s = ref_sin(t_w, omega_w)  
2 % funcao auxiliar de sinal seno  
3 s = sin(argument_r(0, 0, t_w, 0, 0, 1, omega_w, 0));  
4 end %function
```

Código 14: Arquivo de código `signal_r.m`.

```
1 function res = signal_r(x_w, y_w, t_w, amp_w, ang_w, r_w,  
    phase_w, lambda_w, omega_w, S, C, NOISE, SNR_dB, ATT)  
2 % Funcao de sinal senoidal
```



```

3 % x_w = coordenada x associada ao ponto da antena
4 % y_w = coordenada y associada ao ponto da antena
5 % t_w = tempo t associado ao instante de afericao do sinal
6 % amp_w = amplitude desejada para o sinal
7 % ang_w = angulo theta de chegada do sinal em relacao ao
  sistema de antenas
8 % r_w = distancia que o emissor de sinal está da
  coordenada (0,0) do sistema
9 % phase_w = defasagem phi do sinal
10 % lambda_w = comprimento de onda
11 % omega_w = frequencia angular
12 % S = utilizacao de funcao Seno
13 % C = utilizacao de funcao Cosseno
14 % NOISE = se o sinal contara com ruido
15 % SNR_dB = relacao sinal-ruido
16 % ATT = se o sinal contara com atenuacao por distancia
17
18 res = 0;
19 if S
20     res = res + sin( argument_r(x_w, y_w, t_w, ang_w, r_w,
      lambda_w, omega_w, phase_w) );
21 end %if
22 if C
23     res = res + cos( argument_r(x_w, y_w, t_w, ang_w, r_w,
      lambda_w, omega_w, phase_w) );
24 end %if
25 if S && C
26     res = res / sqrt(2);
27 end %if
28
29 if ATT
30     %% Lei de Friis
31     G_t = 1; % Ganho Antena Tx
32     G_r = 1; % Ganho Antena Rx
33     R_t = 1; % Distância do emissor
34     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
35
36     P_t = (amp_w^2)/R_t;
37     P_r = P_t * G_t * G_r * (lambda_w / (4 * pi * r_w));
38
39     amp_r = sqrt(P_r * R_t);
40     res = res * amp_r;
41 else
42     res = res * amp_w;
43 end %if
44
45 if NOISE
46     res = awgn(res, SNR_dB, 'measured');

```

```

47     end %if
48
49 end %function

```

Código 15: Arquivo de código `is octave.m`.

```

1  function r = is octave() % Confere se esta executando no
    octave ou nao
2  persistent x;
3  if (isempty (x))
4      x = exist ('OCTAVE_VERSION', 'builtin');
5  end
6  r = x;
7  end

```

## A.2.2 Função de cálculo para AoA

Código 16: Arquivo de código `calc_AoA.m`.

```

1  function return_struct = calc_AoA( ...
2      amp_w, ...
3      ang_w, ...
4      r_w, ...
5      phase_w, ...
6      lambda_w, ...
7      omega_w, ...
8      S, ...
9      C, ...
10     NOISE, ...
11     SNR_dB, ...
12     ATT, ...
13     resolution, ...
14     d, ...
15     N_antenas ...
16 )
17
18 function Z_phase = phase_z(t, Z_antenna, amp_w, ang_w,
    r_w, phase_w, lambda_w, omega_w, S, C, NOISE, SNR_dB,
    ATT)
19     % Calculos de amostra I/Q para antena em (0,0)
20     I_medido = trapz(t, ref_cos(t, omega_w) ...
21         .* signal_r(real(Z_antenna), imag(Z_antenna), t,
22             amp_w, ang_w, ...
23             r_w, phase_w, lambda_w, omega_w, S, C, NOISE, SNR_dB
24             , ATT));
25     Q_medido = trapz(t, ref_sin(t, omega_w) ...
26         .* signal_r(real(Z_antenna), imag(Z_antenna), t,
27             amp_w, ang_w, ...

```

```

25         r_w, phase_w, lambda_w, omega_w, S, C, NOISE, SNR_dB
           , ATT));
26
27     Z_phase = (omega_w/pi)*(I_medido + i*Q_medido);
28 end % function
29
30 function [Z_phase_A_x_B angle_Z_A_x_B] = dephase_A_to_B(
    Z_phase_A, Z_phase_B)
31     Z_phase_A_x_B = Z_phase_A * conj(Z_phase_B);
32     deltaPhi_A_x_B = angle(Z_phase_A_x_B);
33     angle_Z_A_x_B = acos(deltaPhi_A_x_B/(pi));
34 end % function
35
36 function [delta_A_x_B delta_B_x_A] = deltas_A_B(
    angle_Z_A_x_B, Z_antenna_A, Z_antenna_B)
37     ang_A_x_B = deg2rad(mod(rad2deg(angle(Z_antenna_A -
    Z_antenna_B)),360));
38     delta_A_x_B = ang_A_x_B + angle_Z_A_x_B;
39     delta_B_x_A = ang_A_x_B - angle_Z_A_x_B;
40 end % function
41
42 % Raio do circulo de circunscreve o poligono com N lados
    de tamanho d
43 Rho = d/(2*sin(pi / N_antenas));
44 ant_angles_shift = -90;
45 ant_angles = (0 + ant_angles_shift):(360/N_antenas):(359
    + ant_angles_shift);
46
47 % Coordenadas das antenas
48 ant_array = Rho * exp(i * deg2rad(ant_angles));
49
50 t = linspace(0,(2 * pi / omega_w), resolution); %
    Intervalo de integração
51
52 % Calculos de fase
53 Z_phase_array = arrayfun(@(a) phase_z(t, a, amp_w, ang_w
    , r_w, phase_w, ...
54     lambda_w, omega_w, S, C, NOISE, SNR_dB, ATT),
    ant_array);
55
56 % Calculos de simetria
57 [Z_x_array angle_Z_A_x_B_array] = arrayfun(@(a, b)
    dephase_A_to_B(a, b), ...
58     Z_phase_array, circshift(Z_phase_array,-1));
59
60 [delta_A_x_B delta_B_x_A] = arrayfun(@(ang, a, b)
    deltas_A_B(ang, a, b), ...
61     angle_Z_A_x_B_array, ant_array, circshift(ant_array

```

```

        ,-1));
62
63 % Fazer "votacao" de angulo escolhido
64 range_angle = pi/(2*(N_antenas+1));
65
66 angle_vector = [delta_A_x_B delta_B_x_A];
67 angle_vector = [...
68     (angle_vector(angle_vector<0)+(2*pi)) ...
69     (angle_vector(0<=angle_vector & angle_vector<=(2*pi)))
70     ...
71     (angle_vector((2*pi)<angle_vector)-(2*pi)) ...
72 ]; % Normalizar vetor de angulos entre 0 e 2 pi
73
74 angle_vector_round = round(angle_vector./range_angle).*
75     range_angle;
76 target_angle = mode(angle_vector_round);
77
78 angle_vector = angle_vector(abs(target_angle -
79     angle_vector) <= range_angle ); % Descartar
80     improvavei
81
82 choose_angle = median(angle_vector); % Calcular angulo
83     provavel
84
85 return_struct = { ...
86     choose_angle ...
87     Rho ...
88     ant_array ...
89     Z_phase_array ...
90     Z_x_array ...
91     delta_A_x_B ...
92     delta_B_x_A ...
93 };
94
95 end %function

```

### A.2.3 Função de geração saída visual

Código 17: Arquivo de código `generate_fig.m`.

```

1 function generate_fig(...
2     z_plot,...
3     x_w,...
4     y_w,...
5     ang_w,...
6     lambda_w,...
7     interval,...
8     Rho,...
9     choose_angle,...

```

```

10     ant_array,...
11     Z_phase_array,...
12     Z_x_array,...
13     delta_A_x_B_array,...
14     delta_B_x_A_array...
15 ) % Graficos
16
17 index_list = 1:length(ant_array);
18
19 % Utilizar conjunto de cores diversas para antenas
20 color_list = hsv(length(hsv))(:,:);
21 % if isoctave()
22 %     color_list = rainbow(length(rainbow))(:,:);
23 % else
24 %     color_list = gist_rainbow(length(gist_rainbow))(:,:);
25 % end % if
26
27 % color_list = [...
28 %     [1 0 0];
29 %     [0 1 0];
30 %     [0 0 1]];
31
32 % if length(color_list) < length(ant_array)
33 %     color_list = [...
34 %         [1 0 0];
35 %         [1 1 0];
36 %         [0 1 0];
37 %         [0 1 1];
38 %         [0 0 1];
39 %         [1 0 1]];
40 % end % if
41
42 while length(color_list) < length(ant_array)
43     aux_color_list = normalize(color_list+circshift(
44         color_list,1),"range");
45     color_list = sortrows(cat(1,color_list, aux_color_list
46         .*0.75));
47 end %while
48
49 % Garantir maior contraste entre cores de antenas
50 % color_index = floor(linspace(1,length(color_list),
51 %     length(ant_array)));
52 color_index = floor(index_list * (length(color_list)/
53     length(ant_array)));
54
55 if isoctave()
56     AoA_x = cos(choose_angle);

```

```

53     AoA_y = sin(choose_angle);
54
55     DoA_x = cos(ang_w);
56     DoA_y = sin(ang_w);
57 end % if
58
59 set(0, 'defaultlinellinewidth', 0.5);
60 set(0, 'defaultlinemarkersize', 5);
61 set(0, 'defaultlinemarkerfacecolor', 'auto');
62
63 clf;
64
65 % Calcular a figura de fundo para visualizacao em imagem
66
67 subplot(1,2,2, 'align');
68 surf(x_w,y_w,z_plot); % Desenhando sinal eletromagnetico
69 view(-45, 45)
70
71 colormap('gray');
72 hold on;
73 % Desenhando antenas
74 for idx = index_list
75     ant = ant_array(idx);
76     color = color_list(color_index(idx),:);
77     % color = color_list(1 + mod(idx-1, length(
78         color_list))),:);
79     plot3(real(ant)*[1 1], imag(ant)*[1 1], [-lambda_w
80         lambda_w], '-p', 'color', color);
81 end % for
82
83 plot3([0 lambda_w]*AoA_x, [0 lambda_w]*AoA_y, [
84     lambda_w lambda_w], ':k');
85 plot3(lambda_w*AoA_x, lambda_w*AoA_y, lambda_w, 'hk');
86
87 % Angulo de chegada real
88 plot3(DoA_x*lambda_w, DoA_y*lambda_w, lambda_w, 'ok',
89     'markerfacecolor', 'none', 'markersize', 10, '
90     linewidth', 1);
91
92 shading interp;
93 axis([-interval interval -interval interval -interval
94     interval], 'square')
95 caxis([-lambda_w lambda_w]);
96 hold off;
97
98 % set(0, 'CurrentFigure', fig2d)
99 % clf;
100 subplot(1,2,1, 'align');

```

```

95
96 interval_2d = 1.25*lambda_w;
97 axis([-interval_2d interval_2d -interval_2d interval_2d
98       ], 'square')
99
100 if isoctave()
101     polar(0,0, ':w')
102 else
103     polarplot(0,0, ':w')
104 end % if
105
106 hold on;
107 if isoctave()
108     set( gca, 'rtick', [ 0 : 0.25 : 1 ] );
109     set( gca, 'ttick', [ 0 : 15 : 359 ] );
110 else % MATLAB
111     rticks([ 0 : 0.25 : 1 ]);
112     thetaticks([ 0 : 15 : 359 ]);
113 end %if
114
115 grid on;
116 grid minor;
117
118 for idx = index_list
119     idx_next = idx+1;
120     if idx_next > length(ant_array)
121         idx_next = 1;
122     end %if
123     % color = color_list(idx);
124     % color_next = color_list(idx_next);
125     % color = color_list(1 + mod(idx-1, length(color_list)
126     ),:);
127     % color_next = color_list(1 + mod(idx_next-1, length(
128     color_list)),:);
129     % color = color_list(floor((idx/length(ant_array)) *
130     length(color_list)),:);
131     % color_next = color_list(floor((idx_next/length(
132     ant_array)) * length(color_list)),:);
133     color = color_list(color_index(idx),:);
134     color_next = color_list(color_index(idx_next),:);
135     part_ang_r = 8 + (12-8)*(idx-1)/(length(ant_array)-1);
136
137     % Antenas
138     ant = ant_array(idx);
139     ant_plot_aux = ant/(8 * Rho);
140     if isoctave()
141         plot(real(ant_plot_aux), imag(ant_plot_aux), 'p', '
142             color', color);

```

```

137     else % MATLAB
138         polarplot(angle(ant_plot_aux), abs(ant_plot_aux), 'p
139         ', 'color', color);
140     end % if
141
142     % Fase por antena
143     Z_phase = Z_phase_array(idx);
144     Z_phase_plot_aux = Z_phase/abs(Z_phase)*(4/16);
145     if isoctave()
146         plot(real(Z_phase_plot_aux), imag(Z_phase_plot_aux),
147             'o', 'color', color);
148     else % MATLAB
149         polarplot(angle(Z_phase_plot_aux), abs(
150             Z_phase_plot_aux), 'o', 'color', color);
151     end % if
152
153     % Eixos auxiliares
154     ant_next = ant_array(idx_next);
155     ant_axis = ant_next - ant;
156     if isoctave()
157         plot(real(ant_axis)*[1 -1]/abs(ant_axis), imag(
158             ant_axis)*[1 -1]/abs(ant_axis), '-', 'color',
159             color);
160         plot(real(ant_axis*i)*[1 -1]/abs(ant_axis), imag(
161             ant_axis*i)*[1 -1]/abs(ant_axis), ':', 'color',
162             color);
163     else % MATLAB
164         polarplot(angle(ant_axis), [1 -1], '-', 'color',
165             color);
166         polarplot(angle(ant_axis*i), [1 -1], ':', 'color',
167             color);
168     end % if
169
170     % Defasagem entre antenas
171     Z_A_x_B = Z_x_array(idx);
172     aux_A_x_B = (Z_A_x_B/abs(Z_A_x_B))*(6/16);
173     if isoctave()
174         plot(real(aux_A_x_B), imag(aux_A_x_B), 'd', 'color',
175             color, 'markerfacecolor', color_next, 'linewidth
176             ', 0.75);
177     else % MATLAB
178         polarplot(angle(aux_A_x_B), abs(aux_A_x_B), 'd', '
179             color', color, 'markerfacecolor', color_next, '
180             linewidth', 0.75);
181     end % if
182
183     % Angulos de chegada parciais
184     delta_A_x_B = delta_A_x_B_array(idx);

```



```

172     delta_B_x_A = delta_B_x_A_array(idx);
173     if isoctave()
174         plot(cos(delta_A_x_B)*(part_ang_r/16), sin(
            delta_A_x_B)*(part_ang_r/16), 'v', 'color', color
            , 'markerfacecolor', color_next, 'linewidth',
            0.75);
175         plot(cos(delta_B_x_A)*(part_ang_r/16), sin(
            delta_B_x_A)*(part_ang_r/16), '^', 'color', color
            , 'markerfacecolor', color_next, 'linewidth',
            0.75);
176     else % MATLAB
177         polarplot(delta_A_x_B, part_ang_r/16, 'v', 'color',
            color, 'markerfacecolor', color_next, 'linewidth'
            , 0.75);
178         polarplot(delta_B_x_A, part_ang_r/16, '^', 'color',
            color, 'markerfacecolor', color_next, 'linewidth'
            , 0.75);
179     end % if
180 end % for
181
182 if isoctave()
183     % Angulo de chegada calculado
184     plot([0 7/8]*AoA_x, [0 7/8]*AoA_y, ':k');
185     plot(7/8*AoA_x, 7/8*AoA_y, 'hk');
186     cplx_aux_AoA = i*exp(i*choose_angle);
187     plot(real(cplx_aux_AoA)*[1 -1], imag(cplx_aux_AoA)*[1
        -1], '-k');
188
189     % Angulo de chegada real
190     plot(DoA_x*7/8, DoA_y*7/8, 'ok', 'markerfacecolor', '
        none', 'markersize', 10, 'linewidth', 1);
191 else % MATLAB
192     % Angulo de chegada calculado
193     plot(choose_angle, [0 7/8], ':k');
194     plot(choose_angle, 7/8, 'hk');
195     cplx_aux_AoA = i*exp(i*choose_angle);
196     plot(real(cplx_aux_AoA)*[1 -1], imag(cplx_aux_AoA)*[1
        -1], '-k');
197
198     % Angulo de chegada real
199     plot(ang_w, 7/8, 'ok', 'markerfacecolor', 'none', '
        markersize', 10, 'linewidth', 1);
200 end % if
201
202 hold off;
203
204 end % function

```

## A.2.4 Função geral da simulação

Código 18: Arquivo de código `w_xyt.m`.

```
1 function w_xyt( ...
2     NOISE, ...
3     ATT, ...
4     CHG_PHI, ...
5     CHG_R, ...
6     CHG_THETA, ...
7     S_GIF, ...
8     S_DAT, ...
9     SNR, ...
10    range_step, ...
11    N_antenas ...
12 )
13
14 function ang_norm = normalize_angle(ang)
15     ang_norm = ang;
16     if ang > pi
17         ang_norm = ang_norm - (2*pi);
18     end % if
19     if ang < -pi
20         ang_norm = ang_norm + (2*pi);
21     end % if
22 end % function
23
24 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
25
26 DEBUG = false;
27
28 SNR_dB = 10*log10(SNR);
29
30 phase = 0;
31
32 R_upper = 50;
33 R_lower = 1;
34
35 range_shift = 0;
36
37 DoA_range = (0+range_shift):range_step:(360+range_shift
38     -1);
39 DoA = deg2rad(DoA_range);
40
41 limits = 2; % -+ * Lambda
42
43 c = 1; % Velocidade da luz, simplificacao
44 lambda = 4;
```

```

44     omega = 2*pi*c/lambda;
45     d = lambda / 2;
46     T = 2 * pi / omega;
47
48     amp_0 = 1;
49
50     C = true;
51     S = true;
52
53     interval = limits*lambda;
54     resolution = 100;
55
56     space = linspace(-interval,interval,resolution+1); % 1-
57           by-100
58     [x, y] = meshgrid(space);
59     t_0 = 0;
60
61     ant_idx_list = 1:1:N_antenas;
62     ant_idx_list_shift = circshift(ant_idx_list, 1);
63
64     name = 'simul';
65     folder = '';
66
67     name = [name '_POLY_' num2str(N_antenas)];
68     folder = [folder 'POLY_' num2str(N_antenas)];
69
70     if CHG_R
71         name = [name '_R_' num2str(R_upper) '~' num2str(
72             R_lower) ];
73     else
74         name = [name '_R_' num2str(R_upper)];
75     end %if
76     if ~CHG_THETA
77         name = [name '_FIXED_W'];
78     end %if
79     if NOISE
80         name = [name '_SNR_' num2str(SNR)];
81     end %if
82     if ATT
83         name = [name '_ATT'];
84     end %if
85
86     if (S_GIF || S_DAT)
87         foldername = fullfile('Output', folder);
88         if not(isfolder(foldername))
89             mkdir(foldername);
90         end %if
91         if S_GIF

```

```

90     gif_filename = fullfile(foldername, [name '.gif']);
91 end %if
92 if S_DAT
93     dat_filename = fullfile(foldername, [name '.dat']);
94 end %if
95 end %if
96
97 if S_GIF
98     if isoctave()
99         f = figure(1, 'name', name, 'visible', 'off', '
100             Position', [1 1 1000 500]);
101     else % MATLAB
102         f = figure('name', name, 'visible', 'off', 'Position
103             ', [1 1 1000 500]);
104     end % if
105 else
106     f = figure('name', name);
107 end %if
108
109 if S_DAT
110     dat_file = fopen(dat_filename, 'w');
111     fprintf(dat_file, "%s", "percent");
112     fprintf(dat_file, "\t%s", "ang_W");
113     fprintf(dat_file, "\t%s", "r");
114     fprintf(dat_file, "\t%s", "phase");
115     fprintf(dat_file, "\t%s", "choose_angle");
116     for i = ant_idx_list
117         fprintf(dat_file, "\t%s%d_x_%d", "delta_", i,
118             ant_idx_list_shift(i));
119     end % for
120     for i = ant_idx_list
121         fprintf(dat_file, "\t%s%d_x_%d", "delta_",
122             ant_idx_list_shift(i), i);
123     end % for
124     fprintf(dat_file, "\n");
125     if isoctave()
126         fflush(dat_file);
127     end %if
128 end % if
129
130 DoA_loop_range = [DoA_range DoA_range 360]; % Duas
131     voltas
132
133 percent = 0;
134 ref_iteration = 1/(length(DoA_loop_range)-1);
135 it = 0;
136 DelayTime = 15*ref_iteration;

```

```

133     r = R_upper+R_lower;
134
135     for DoA = DoA_loop_range
136         it = it + 1;
137
138         fprintf('%.2f%% -> %s\n', percent*100, name);
139
140         if CHG_PHI
141             phase = phase + 2*pi*ref_iteration;
142         end %if
143
144         if CHG_R
145             r = r - R_upper/(2*length(DoA_range));
146         end %if
147
148         if CHG_THETA
149             ang_W = deg2rad(DoA);
150         else
151             ang_W = pi*5/12;
152         end %if
153
154         return_struct = calc_AoA(amp_0, ang_W, r, phase,
155             lambda, ...
156             omega, S, C, NOISE, SNR_dB, ATT, resolution, d ,
157             N_antenas);
158
159         [ ...
160             choose_angle, ...
161             Rho, ...
162             ant_array, ...
163             Z_phase_array, ...
164             Z_x_array, ...
165             delta_A_x_B, ...
166             delta_B_x_A, ...
167         ] = return_struct{:};
168
169         % Calcular a figura de fundo para visualizacao em
170         % imagem
171         z_plot = signal_r(x, y, t_0, amp_0, ang_W, r, phase,
172             ...
173             lambda, omega, S, C, NOISE, SNR_dB, ATT);
174
175         generate_fig( ...
176             z_plot, ...
177             x, ...
178             y, ...
179             ang_W, ...
180             lambda, ...

```

```

177     interval, ...
178     Rho, ...
179     choose_angle, ...
180     ant_array, ...
181     Z_phase_array, ...
182     Z_x_array, ...
183     delta_A_x_B, ...
184     delta_B_x_A ...
185 )
186
187 drawnow;
188
189 if S_GIF
190     frame = getframe(f);
191     im = frame2im(frame);
192
193     [imind, cm] = rgb2ind(im);
194     if it == 1
195         % Create GIF file
196         imwrite(imind, cm, gif_filename, 'gif', 'DelayTime',
197             DelayTime , 'Compression' , 'lzw');
198     else
199         % Add each new plot to GIF
200         imwrite(imind, cm, gif_filename, 'gif', 'WriteMode',
201             'append', 'DelayTime', DelayTime , 'Compression'
202             , 'lzw');
203     end %if
204 else
205     % pause(1/30)
206     pause(0.0001)
207 end %if
208
209 if S_DAT
210     fprintf(dat_file, "%.2f", percent*100);
211     fprintf(dat_file, "\t%.3f", normalize_angle(ang_W));
212     fprintf(dat_file, "\t%.3f", r);
213     fprintf(dat_file, "\t%.3f", normalize_angle(phase));
214     fprintf(dat_file, "\t%.3f", normalize_angle(
215         choose_angle));
216
217     for i = ant_idx_list
218         fprintf(dat_file, "\t%.3f", normalize_angle(
219             delta_A_x_B(i)));
220     end % for
221     for i = ant_idx_list
222         fprintf(dat_file, "\t%.3f", normalize_angle(
223             delta_B_x_A(i)));
224     end % for

```

```

219
220     fprintf(dat_file, "\n");
221     if isoctave()
222         fflush(dat_file);
223     end %if
224 end % if
225
226     percent = percent + ref_iteration;
227
228 end %for
229
230 if S_GIF
231     printf('Check: %s\a\n', gif_filename);
232 end %if
233
234 if S_DAT
235     fclose(dat_file);
236     printf('Check: %s\a\n', dat_filename);
237 end %if
238
239 end %function

```

## A.2.5 Arquivos de simulação em sequência

Código 19: Arquivo de código w\_xyt\_single.m.

```

1  clear all;
2  close all;
3  clc;
4
5  if isoctave()
6      pkg load communications;
7      pkg load statistics;
8  end %if
9
10 w_xyt( ...
11     true, ... % NOISE
12     false, ... % ATT
13     false, ... % CHG_PHI
14     false, ... % CHG_R
15     true, ... % CHG_THETA
16     true, ... % S_GIF
17     true, ... % S_DAT
18     1/1, ... % SNR
19     5, ... % range_step
20     5 ... % N_antenas
21 );

```

Código 20: Arquivo de código w\_xyt\_dat.m.

```

1  clear all;
2  close all;
3  clc;
4
5  if isoctave()
6      pkg load communications;
7      pkg load statistics;
8  end %if
9
10 S_GIF = true;
11 S_DAT = true;
12
13 range_step = 5;
14
15 N_antennas = 3;
16
17 % w_xyt(NOISE, ATT, CHG_PHI, CHG_R, CHG_THETA, S_GIF,
    S_DAT, SNR, range_step, N_antennas);
18
19 % % w_xyt(false, false, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    1/1, range_step, N_antennas);
20 % % w_xyt(true, false, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    1/1, range_step, N_antennas);
21 % % w_xyt(true, false, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    5/1, range_step, N_antennas);
22 % % w_xyt(true, false, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    25/1, range_step, N_antennas);
23 % % w_xyt(true, false, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    50/1, range_step, N_antennas);
24 % % w_xyt(true, false, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    100/1, range_step, N_antennas);
25
26 % % w_xyt(false, true, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    1/1, range_step, N_antennas);
27 % % w_xyt(true, true, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    1/1, range_step, N_antennas);
28 % % w_xyt(true, true, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    5/1, range_step, N_antennas);
29 % % w_xyt(true, true, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    25/1, range_step, N_antennas);
30 % % w_xyt(true, true, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    50/1, range_step, N_antennas);
31 % % w_xyt(true, true, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    100/1, range_step, N_antennas);
32
33 w_xyt(false, false, false, false, true, S_GIF, S_DAT,
    1/1, range_step, N_antennas);
34 % % w_xyt(false, false, false, true, true, S_GIF, S_DAT,

```



```

    1/1,    range_step, N_antenas);
35
36 w_xyt(false, true, false, false, true, S_GIF, S_DAT,
    1/1,    range_step, N_antenas);
37 % % w_xyt(false, true, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    1/1,    range_step, N_antenas);
38
39 % % w_xyt(true, false, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    1/1,    range_step, N_antenas);
40 % % w_xyt(true, false, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    5/1,    range_step, N_antenas);
41 % % w_xyt(true, false, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    25/1,   range_step, N_antenas);
42 % % w_xyt(true, false, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    50/1,   range_step, N_antenas);
43 % % w_xyt(true, false, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    100/1,  range_step, N_antenas);
44
45 % % w_xyt(true, true, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    1/1,    range_step, N_antenas);
46 % % w_xyt(true, true, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    5/1,    range_step, N_antenas);
47 % % w_xyt(true, true, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    25/1,   range_step, N_antenas);
48 % % w_xyt(true, true, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    50/1,   range_step, N_antenas);
49 % % w_xyt(true, true, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    100/1,  range_step, N_antenas);
50
51 w_xyt(true, false, false, false, true, S_GIF, S_DAT,
    1/1,    range_step, N_antenas);
52 w_xyt(true, false, false, false, true, S_GIF, S_DAT,
    5/1,    range_step, N_antenas);
53 w_xyt(true, false, false, false, true, S_GIF, S_DAT,
    25/1,   range_step, N_antenas);
54 w_xyt(true, false, false, false, true, S_GIF, S_DAT,
    50/1,   range_step, N_antenas);
55 w_xyt(true, false, false, false, true, S_GIF, S_DAT,
    100/1,  range_step, N_antenas);
56
57 w_xyt(true, true, false, false, true, S_GIF, S_DAT,
    1/1,    range_step, N_antenas);
58 w_xyt(true, true, false, false, true, S_GIF, S_DAT,
    5/1,    range_step, N_antenas);
59 w_xyt(true, true, false, false, true, S_GIF, S_DAT,
    25/1,   range_step, N_antenas);
60 w_xyt(true, true, false, false, true, S_GIF, S_DAT,
    50/1,   range_step, N_antenas);

```

```

61 w_xyt(true, true, false, false, true, S_GIF, S_DAT,
    100/1, range_step, N_antenas);

```

Código 21: Archivo de código w\_xyt\_auto.m.

```

1  clear all;
2  close all;
3  clc;
4
5  if isoctave()
6      pkg load communications;
7      pkg load statistics;
8  end %if
9
10 S_GIF = true;
11 S_DAT = false;
12
13 range_step = 5;
14
15 N_antenas = 7;
16
17 % w_xyt(NOISE, ATT, CHG_PHI, CHG_R, CHG_THETA, S_GIF,
    S_DAT, SNR, range_step, N_antenas);
18
19 w_xyt(false, false, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    1/1, range_step, N_antenas);
20 w_xyt(true, false, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    1/1, range_step, N_antenas);
21 w_xyt(true, false, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    5/1, range_step, N_antenas);
22 w_xyt(true, false, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    25/1, range_step, N_antenas);
23 w_xyt(true, false, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    50/1, range_step, N_antenas);
24 w_xyt(true, false, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    100/1, range_step, N_antenas);
25
26 w_xyt(false, true, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    1/1, range_step, N_antenas);
27 w_xyt(true, true, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    1/1, range_step, N_antenas);
28 w_xyt(true, true, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    5/1, range_step, N_antenas);
29 w_xyt(true, true, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    25/1, range_step, N_antenas);
30 w_xyt(true, true, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    50/1, range_step, N_antenas);
31 w_xyt(true, true, true, false, false, S_GIF, S_DAT,
    100/1, range_step, N_antenas);

```

```

32
33 % w_xyt(false, false, false, false, true, S_GIF, S_DAT,
    1/1, range_step, N_antenas);
34 w_xyt(false, false, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    1/1, range_step, N_antenas);
35
36 % w_xyt(false, true, false, false, true, S_GIF, S_DAT,
    1/1, range_step, N_antenas);
37 w_xyt(false, true, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    1/1, range_step, N_antenas);
38
39 w_xyt(true, false, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    1/1, range_step, N_antenas);
40 w_xyt(true, false, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    5/1, range_step, N_antenas);
41 w_xyt(true, false, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    25/1, range_step, N_antenas);
42 w_xyt(true, false, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    50/1, range_step, N_antenas);
43 w_xyt(true, false, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    100/1, range_step, N_antenas);
44
45 w_xyt(true, true, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    1/1, range_step, N_antenas);
46 w_xyt(true, true, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    5/1, range_step, N_antenas);
47 w_xyt(true, true, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    25/1, range_step, N_antenas);
48 w_xyt(true, true, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    50/1, range_step, N_antenas);
49 w_xyt(true, true, false, true, true, S_GIF, S_DAT,
    100/1, range_step, N_antenas);
50
51 % w_xyt(true, false, false, false, true, S_GIF, S_DAT,
    1/1, range_step, N_antenas);
52 % w_xyt(true, false, false, false, true, S_GIF, S_DAT,
    5/1, range_step, N_antenas);
53 % w_xyt(true, false, false, false, true, S_GIF, S_DAT,
    25/1, range_step, N_antenas);
54 % w_xyt(true, false, false, false, true, S_GIF, S_DAT,
    50/1, range_step, N_antenas);
55 % w_xyt(true, false, false, false, true, S_GIF, S_DAT,
    100/1, range_step, N_antenas);
56
57 % w_xyt(true, true, false, false, true, S_GIF, S_DAT,
    1/1, range_step, N_antenas);
58 % w_xyt(true, true, false, false, true, S_GIF, S_DAT,
    5/1, range_step, N_antenas);

```

```
59 | % w_xyt(true, true, false, false, true, S_GIF, S_DAT,  
    | 25/1, range_step, N_antenas);  
60 | % w_xyt(true, true, false, false, true, S_GIF, S_DAT,  
    | 50/1, range_step, N_antenas);  
61 | % w_xyt(true, true, false, false, true, S_GIF, S_DAT,  
    | 100/1, range_step, N_antenas);
```