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 coises 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 %. À medida de comparação, também foram simulados casos equivalentes utilizando o algoritmo de Gauss-Newton, que demonstrou problemas em lidar com ruído e atenuação. 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 %. For comparison, equivalent cases were also simulated using the Gauss-Newton algorithm, which demonstrated problems in dealing with noise and attenuation. 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

Lista de Tabelas

Códigos

Abreviaturas e Siglas

AoA	Ângulo de Chegada (*Angle of Arrival*)
ATT	Atenuação
AWGN	Ruído Gaussiano Branco Aditivo (*Additive White Gaussian Noise*)
BLE	*Bluetooth* de Baixo Consumo de Energia (*Bluetooth Low Energy*)
FFT	Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*)
GN	Gauss-Newton
GNSS	Sistema Global de Navegação por Satélite (*Global Navigation Satellite System*)
GPS	Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System*)
IoT	Internet das Coisas (*Internet of Things*)
LoRa	*Longe Range*
LoS	Linha de visão (*Line of Sight*)
NaN	Número Indefinido ou Inválido (*Not a Number*)
NLoS	Sem Linha de visão (*Non Line of Sight*)
RF	Radiofrequência (*Radio Frequency*)
SDR	Rádio Definido por *Software* (*Software-Defined Radio*)
SNR	Relação Sinal-Ruído (*Signal-Noise Ratio*)
UCA	Arranjo Circular Uniforme (*Uniform Circular Array*)
ULA	Arranjo Linear Uniforme (*Uniform Linear Array*)

Símbolos e Operadores

$\mathbf{A_g}$	Coordenada geográfica A
A_k	k-ésima antena do arranjo
$\mathbf{B_g}$	Coordenada geográfica B
c	Velocidad da luz no ar
$D_{\mathbf{ant}}$	Maior dimensão da antena emissora para cálculo da distância de Fraunhofer
d	Distância entre antenas
$d_{\mathbf{F}}$	Distância de Fraunhofer
$d_{\mathbf{AB}}$	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
$\imath$	Unidade imaginária, $\sqrt{-1}$
k	Índice das antenas do arranjo
$N_{\mathbf{ant}}$	Número de antenas do arranjo
Q_k	Componente em quadratura do valor complexo do sinal recebido
$R_{\mathbf{Terra}}$	Raio do planeta
T	Período do sinal w de interesse
w	Sinal de interesse para análise, incidente no arranjo 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
α_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}
β_b	Ângulo de *bearing* relativo
$\Delta\Phi_k$	Diferença de fase em par de antenas A_k e A_{k+1}
Δ_θ	Diferença entre os ângulos $\theta_{\mathbf{A}_\mathrm{g}}$ e $\theta_{\mathbf{B}_\mathrm{g}}$
Δ_ϕ	Diferença entre os ângulos $\phi_{\mathbf{A}_\mathrm{g}}$ e $\phi_{\mathbf{B}_\mathrm{g}}$
δ	Intervalo de quantização e de filtro para valores de Θ

Θ	Conjunto de todos os valores $\theta_{\pm k}$ aferidos
$\Theta_{\lfloor\bullet\rceil}$	Valores de Θ quantizados por δ
$\Theta_{\mathbf{F}}$	Valores de Θ filtrados
$\theta_{\mathbf{AoA}}$	Valor do Ângulo de Chegada AoA
$\theta_{\pm k}$	Par de possíveis ângulos de θ_{AoA} referentes ao par de antenas A_k e A_{k+1}
$\theta_{\mathcal{M}_o}$	Moda estatística do conjunto $\Theta_{\lfloor\bullet\rceil}$
$\theta_{\mathbf{A_g}}$	Longitude da coordenada geográfica A
$\theta_{\mathbf{B_g}}$	Longitude da coordenada geográfica B
λ	Comprimento de onda do sinal w de interesse
ρ	Raio do polígono regular formador do arranjo de antenas
Φ_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
ω	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
$\lfloor h\rceil$	Operação arredondar, arredonda o valor de h para o inteiro mais próximo

Sumário

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

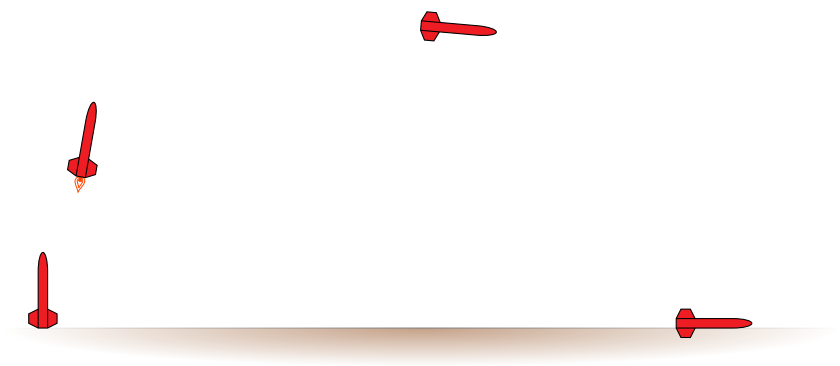
Foguetes de sondagem atmosférica são veículos aeroespaciais sub-orbitais utilizados para levar sensores e experimentos científicos a altos níveis atmosféricos, com o intuito de realizar estudos e análises relacionados às diversas condições ali presentes [1]. Estes veículos geralmente utilizam motor de 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 rastreio, 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 revisão de trabalhos relacionados e fundamentação teórica. 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 um breve levantamento de trabalhos relacionados, que mostram a relevância do assunto abordado, bem como a fundamentação teórica utilizada ao longo do trabalho.

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 $R_{\text{Terra}} = 6371 \cdot 10^3$ m [7, 8]. A latitude equivale à componente polar ϕ centralizada na linha do equador, enquanto a longitude equivale à componente θ centralizada no meridiano de Greenwich [7, 9].

Conhecendo as coordenadas de dois pontos distintos A e B, é possível determinar seu ângulo de *bearing* β_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 $\mathbf{A}_\text{g}$ e $\mathbf{B}_\text{g}$ duas coordenadas geográficas, $\phi_{\mathbf{A}_\text{g}}$ e $\phi_{\mathbf{B}_\text{g}}$ suas respectivas latitudes, e $\theta_{\mathbf{A}_\text{g}}$ e $\theta_{\mathbf{B}_\text{g}}$ suas respectivas longitudes, conforme ilustrado na Figura 2.

Calculam-se Δ_ϕ e Δ_θ conforme Equações 1 e 2, respectivamente.

$$\Delta_\phi = \phi_{\mathbf{B}_\text{g}} - \phi_{\mathbf{A}_\text{g}} \tag{1}$$

$$\Delta_\theta = \theta_{\mathbf{B}_\text{g}} - \theta_{\mathbf{A}_\text{g}} \tag{2}$$

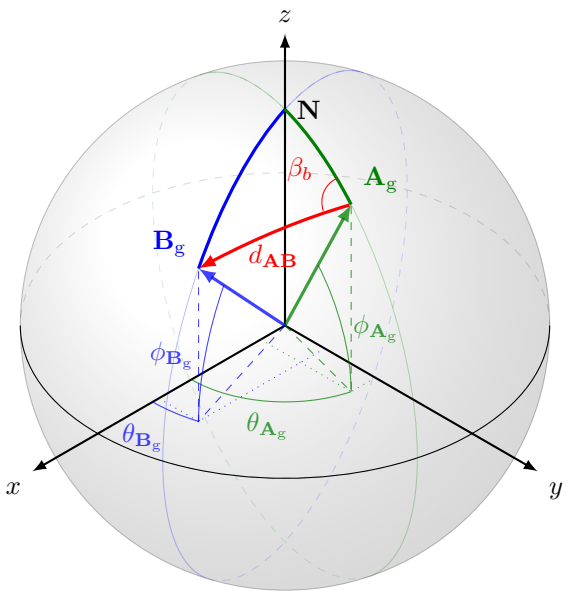
Através da lei dos haversines é possível obter a distância mínima d entre as coordenadas, sobre a superfície, e também o ângulo de *Bearing* β_b formado no vértice $\mathbf{A}_\text{g}$ do triângulo esférico $\mathbf{N}\mathbf{A}_\text{g}\mathbf{B}_\text{g}$ [8]. Para o cálculo de distância, os ângulos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

$$X = \cos\left(\theta_{\mathbf{B}_\text{g}}\right) \cdot \sin\left(\Delta_\phi\right) \tag{3}$$

$$Y = \cos\left(\theta_{\mathbf{A}_\text{g}}\right) \cdot \sin\left(\theta_{\mathbf{B}_\text{g}}\right) - \sin\left(\theta_{\mathbf{A}_\text{g}}\right) \cdot \cos\left(\theta_{\mathbf{B}_\text{g}}\right) \cdot \cos\left(\Delta_\phi\right) \tag{4}$$

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

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



Fonte: Autor.

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

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

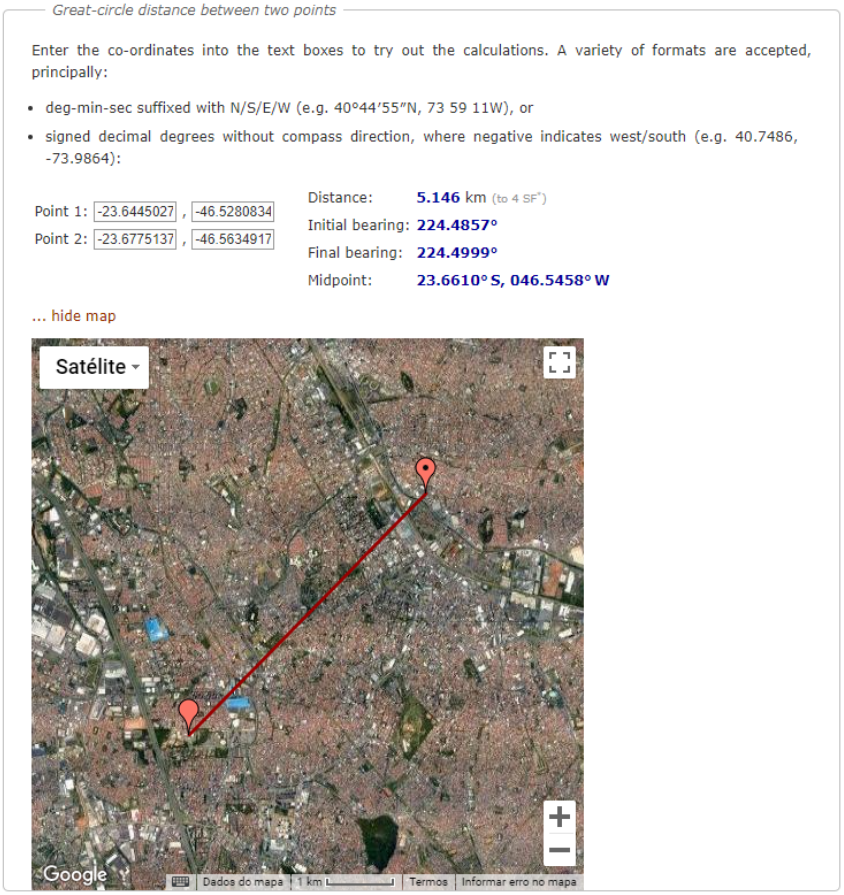
O ângulo β_b calculado aqui é referente à direção cardeal Norte, assim, uma equipe de busca equipada com uma bússola simples seria capaz de seguir a direção correta. A Figura 3 apresenta a aplicação desenvolvida por Veness, capaz de calcular o ângulo de *Bearing* entre duas coordenadas, note que, neste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

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 λ do sinal e a velocidade da luz no meio, usualmente tomada como $c = 299792458{,}6 \pm 0{,}3\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ no ar [10, 11, 12, 13]. A Equação 8 apresenta a relação do comprimento de onda λ com a frequência f, a frequência angular ω e a velocidade da luz c.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi \cdot c}{\omega} \tag{8}$$

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

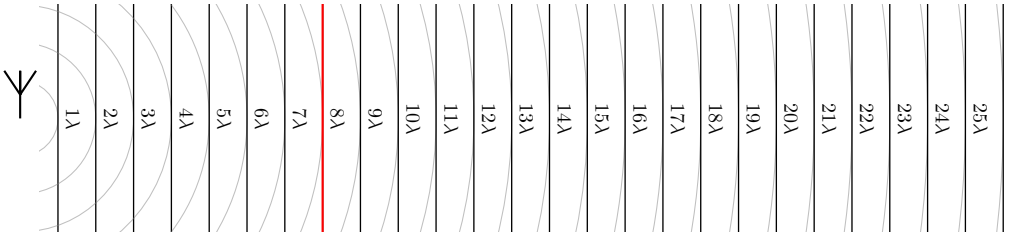


Fonte: Veness 2019 [8]

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_{ant} é a maior dimensão da antena emissora [14]. Tomando $D_{\mathrm{ant}} = 2\lambda$, para uma antena de dipolo, obtém-se $d_{\mathrm{F}} = 8\lambda$. A Figura 4 ilustra o comportamento planar de uma frente de onda, com destaque na distância d_{F}.

$$d_{\mathrm{F}} = \frac{2 \cdot {D_{\mathrm{ant}}}^2}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad d_{\mathrm{F}} = \frac{2 \cdot (2 \cdot \lambda)^2}{\lambda} = 8\lambda \tag{9}$$

Figura 4: Característica de frente de onda a cada λ a partir da antena emissora, destaque para $d_{\mathrm{F}} = 8\lambda$.



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.

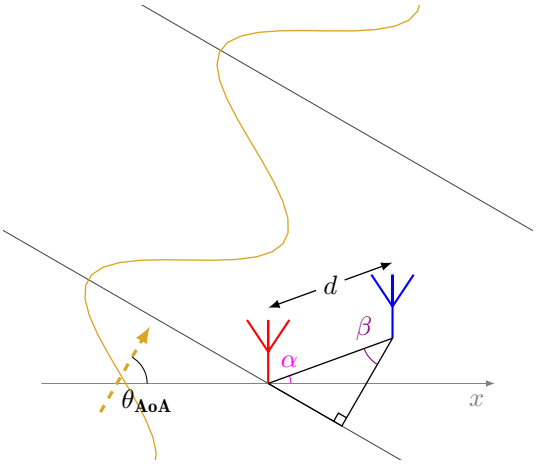
$$d \cdot \cos\left(\beta_{\pm k}\right) = \lambda \cdot \frac{\Delta\Phi_k}{2\pi} \tag{10}$$

É importante ressaltar que um sistema com um único par de antenas não é suficiente para determinar completamente o θ_{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 θ_{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.

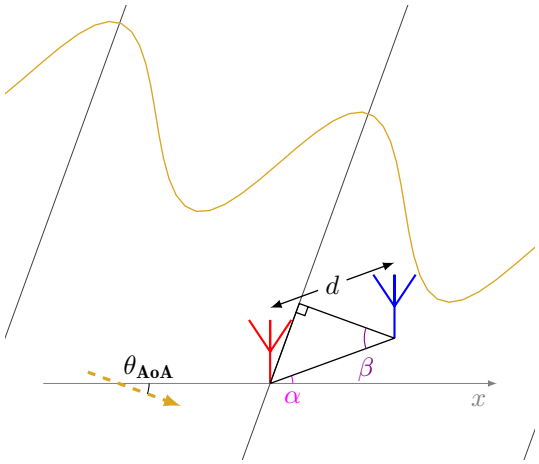
A escolha da distância d entre as antenas deve ser feita de forma a otimizar a resolução da medida de defasagem, com a maior distância possível. Porém é necessário evitar ambiguidades na análise, por se tratar de um sinal periódico, o valor se repetirá a cada λ, e terá valores simétricos quando $d >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

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

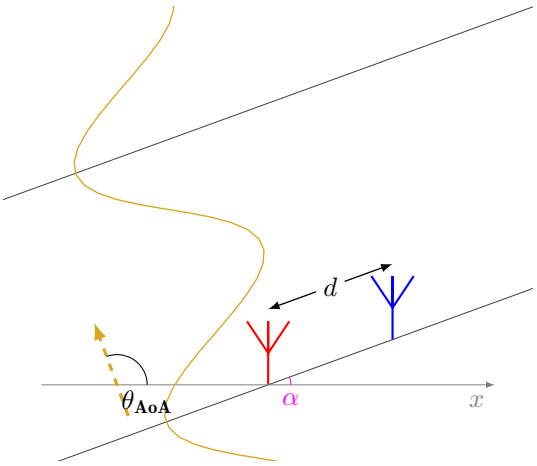
(a) $\theta_{\text{AoA}} = 60°$, $\beta_{\pm k} = 40°$



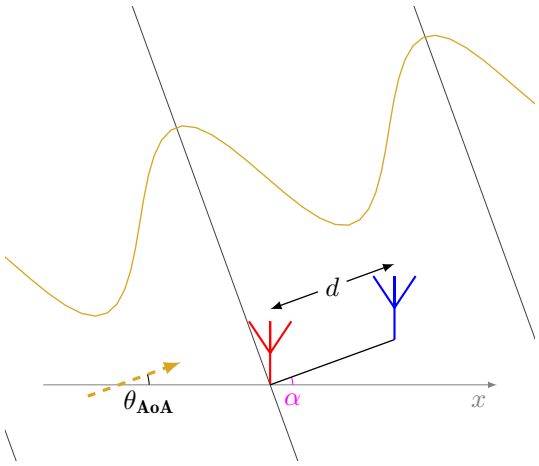
(b) $\theta_{\text{AoA}} = -20°$, $\beta_{\pm k} = 40°$



(c) $\theta_{\text{AoA}} = 110°$, $\beta_{\pm k} = 90°$



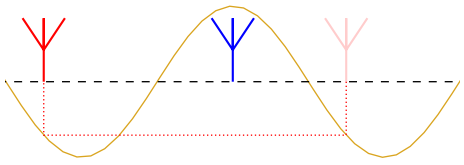
(d) $\theta_{\text{AoA}} = 20°$, $\beta_{\pm k} = 0°$



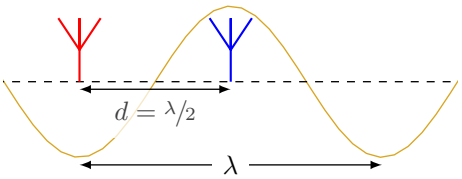
Fonte: Autor.

Figura 6: Diferentes valores para d.

(a) $d > \lambda/2$



(b) $d = \lambda/2$



Fonte: Autor.

$$d = \frac{\lambda}{2} \tag{11}$$

Para contornar a ambiguidade de simetria, é possível adicionar mais antenas à malha. O conjunto de N_{ant} antenas deve respeitar a distância d entre as antenas de um par, e pode ser disposto como um polígono regular com N_{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_{ant} implicam que existirão pares de antenas paralelos, que resultam em leituras redundantes.

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

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

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 α_k em que um par de antenas A_k e A_{k+1} se dispõe em relação à geometria do sistema, conforme Equação 15.

$$k = \{1, 2, \ldots, N_{\text{ant}}\} \tag{13}$$

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

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

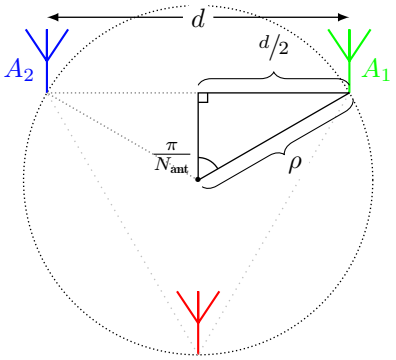
Para calcular a fase em uma antena, é interessante representar o sinal recebido como um valor complexo. Uma forma de obter o complexo de fase consiste em analisar a correlação do sinal incidente w com sinais de referência de mesma frequência que o sinal de interesse, em um período completo, Equação 16. 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.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f} \tag{16}$$

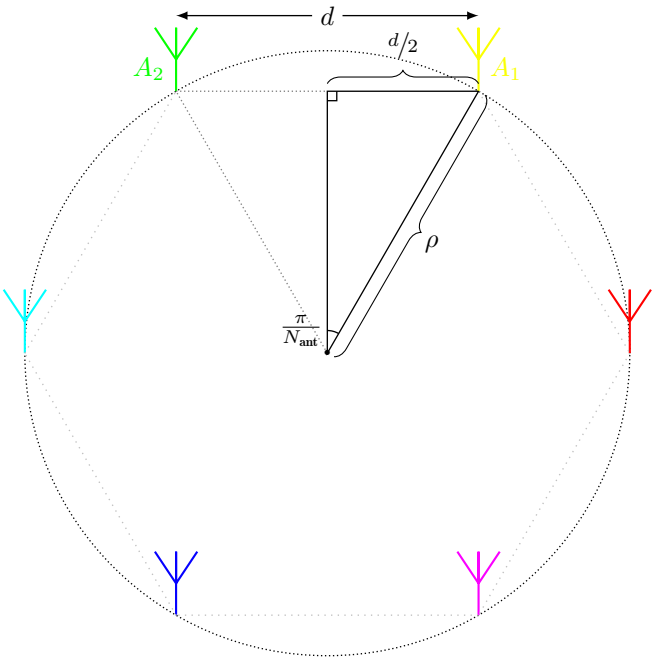
$$I_k = \int_0^T \cos\,(\omega \cdot \tau) \cdot w\,(x_{A_k},\ y_{A_k},\ \tau)\,\partial\tau \tag{17}$$

Figura 7: Diferentes distribuições de antenas.

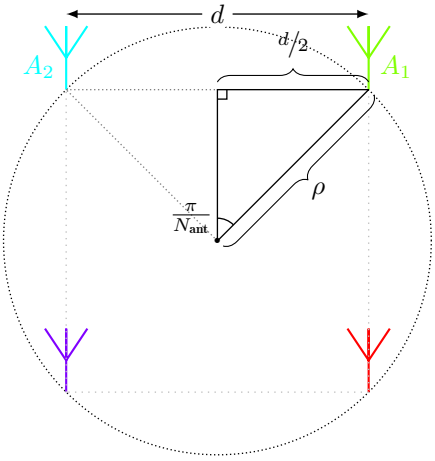
(a) $N_{\text{ant}} = 3$.



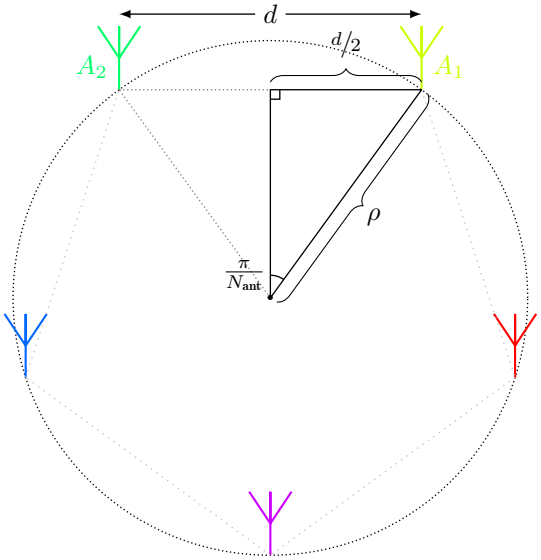
(b) $N_{\text{ant}} = 6$.



(c) $N_{\text{ant}} = 4$.



(d) $N_{\text{ant}} = 5$.



Fonte: Autor.

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

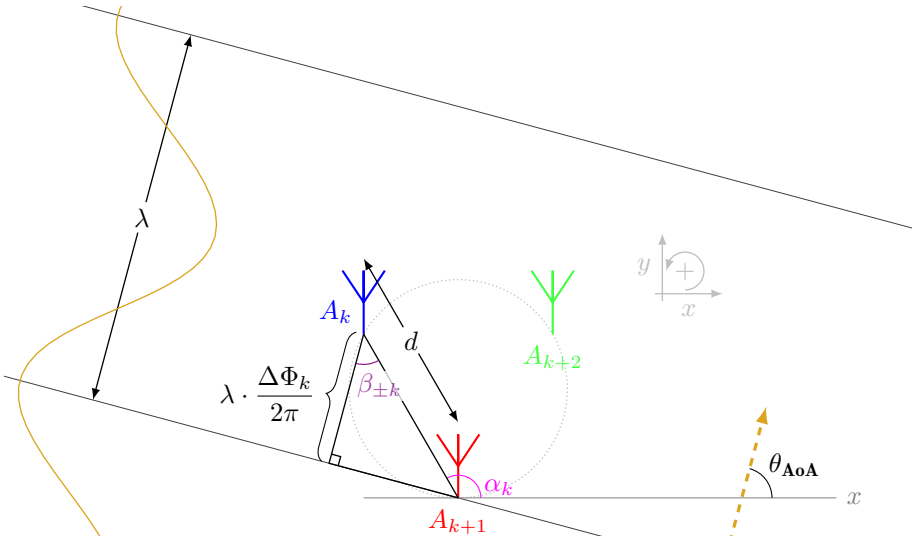
$$Z_k = \frac{\omega}{\pi} \cdot (I_k + \imath Q_k) \tag{19}$$

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 $N_{\text{ant}} = 3$.

$$\Delta\Phi_k = \Phi_k - \Phi_{k+1} = \arg(Z_k) - \arg(Z_{k+1}) = \arg\left(Z_k \cdot \overline{Z_{k+1}}\right) \tag{20}$$

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

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 θ_{AoA}. A Equação 23 define o conjunto Θ 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 θ_{AoA} e os demais são valores distintos do objetivo e entre si.

$$\theta_{\pm k} = \alpha_k \pm \beta_{\pm k} \tag{22}$$

$$\Theta = \{\theta_{\pm k} \mid \forall k\} \tag{23}$$

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

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

$$\Theta_{\lfloor\bullet\rceil} = \left\{ \left\lfloor \frac{\theta}{\delta} \right\rceil \cdot \delta \;\middle|\; \forall\theta \in \Theta \right\} \tag{25}$$

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

$$\theta_{\mathcal{M}_o} = \mathcal{M}_o\left(\Theta_{\lfloor\bullet\rceil}\right) \tag{26}$$

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

$$\Theta_{\text{F}} = \{\theta \in \Theta \mid \theta_{\mathcal{M}_o} - \delta \leq \theta \leq \theta_{\mathcal{M}_o} + \delta\} \tag{27}$$

Finalmente obtém-se o valor de θ_{AoA} pela mediana dos valores em Θ_{F}, conforme Equação 28.

$$\theta_{\text{AoA}} = \widetilde{\Theta_{\text{F}}} \tag{28}$$

2.2 Trabalhos relacionados

Em seu trabalho, Horst [12] analisa dois algoritmos de detecção de AoA, realizando as análises em ambientes internos e utilizando arranjos 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 *Longe 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 Arranjo 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

O trabalho de Schmidt e Hellbrück [23] é o mais recente dentre os levantados, e propõe estimar o AoA utilizando do algoritmo de Gauss-Newton (GN). O sistema proposto é baseado na tecnologia de *Bluetooth* de Baixo Consumo de Energia (*Bluetooth Low Energy*, BLE), presente em alguns dispositivos IoT, para a localização em ambiente fechado. Essa proposta será adaptada para comparação com os resultados do presente trabalho.

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 θ_{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 do arranjo;
- `choose_angle`, ângulo θ_{AoA} final calculado pelo sistema;
- `interval`, indica os limites para a geração de imagem da simulação;
- `lambda_w`, comprimento de onda λ;
- `N_antenas`, quantidade N_{ant} de antenas do arranjo;
- `omega_w`, frequência angular ω;
- `phase_w`, fase ϕ do sinal no emissor;
- `Rho`, raio ρ do polígono que dispõe as antenas no arranjo;
- `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 ou y no espaço para aferição do sinal w;
- `Z_antenna`, `Z_antenna_A` ou `Z_antenna_B`, valor complexo, coordenada de antena;
- `Z_phase_A` ou `Z_phase_B`, valor complexo, fase Φ_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 do arranjo;
- `delta_A_x_B_array`, contendo o ângulo $\theta_{\pm k}$ calculado por $\alpha_k + \beta_{\pm k}$ aferido para cada par de antenas do arranjo;
- `delta_B_x_A_array`, contendo o ângulo $\theta_{\pm k}$ calculado por $\alpha_k - \beta_{\pm k}$ aferido para cada par de antenas do arranjo;
- `Z_phase_array`, matriz de valores numéricos complexos, contendo o sinal complexo aferido para cada antena do arranjo;
- `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 no arranjo;

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`, `phase_w`, `lambda_w` e `omega_w`. O Código 1 apresenta uma versão simplificada da função `argument_r` desenvolvida.

Código 1: Função `argument_r`, simplificada.

```
function res = argument_r(...)
  r_0 = r_w * lambda_w;

  x_0 = r_0 * cos(ang_w);
  y_0 = r_0 * sin(ang_w);

  res = (2*pi/lambda_w) * ( sqrt((y_w-y_0).^2 + ...
    (x_w-x_0).^2) ) + omega_w*t_w + phase_w;
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.

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

Fonte: Autor.

Código 3: Função `ref_sin`, simplificada.

```
function s = ref_sin(...)
  s = sin(argument_r(0, 0, t_w, 0, 0, 0, 1, omega_w));
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 [24, 25]. O Código 4 apresenta uma versão simplificada da função `signal_r` desenvolvida.

Código 4: Função `signal_r`, simplificada.

```
function res = signal_r(...)
  res = 0;
  if S
    res = res + sin( argument_r(...) );
  end %if
  if C
    res = res + cos( argument_r(...) );
  end %if
  if S && C
    res = res / sqrt(2);
  end %if
  if ATT
    %%% Lei de Friis
    G_t = 1; % Ganho Antena Tx
    G_r = 1; % Ganho Antena Rx
    %%% Potencia eletrica
    R_t = 1; % Resistencia Antena Tx (Reatância)
    R_r = 1; % Resistencia Antena Rx (Reatância)
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    P_t = (amp_w^2)/R_t;
    P_r = P_t * G_t * G_r * (lambda_w / (4 * pi * r_w));
    amp_r = sqrt(P_r * R_r);
    res = res * amp_r;
  else
    res = res * amp_w;
  end %if
  if NOISE
    res = awgn(res, SNR_dB, 'measured');
  end %if
end %function
```

Fonte: Autor.

A função `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 5 apresenta uma versão simplificada da função `phase_z` desenvolvida.

O cálculo do valor complexo de defasagem $\Delta\Phi_k$, o ângulo relativo $\beta_{\pm k}$ e o ângulo α_k entre um par de antenas é realizado pela função `dephase_A_to_B`. Seus argumentos são,

Código 5: Função `phase_z`, simplificada.

```
function Z_phase = phase_z(...)
  I_medido = trapz(t, ref_cos(...) .* signal_r(...) );
  Q_medido = trapz(t, ref_sin(...) .* signal_r(...) );

  Z_phase = (omega_w/pi)*(I_medido + i*Q_medido);
end % function
```

Fonte: Autor.

respectivamente, `Z_phase_A` e `Z_phase_B`. O Código 6 apresenta uma versão simplificada da função `dephase_A_to_B` desenvolvida.

Código 6: Função `dephase_A_to_B`, simplificada.

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

Fonte: Autor.

Os ângulos $\theta_{\pm k}$ para um par de antenas são calculados pela função `deltas_A_B`. Seus argumentos são, respectivamente, `angle_Z_A_x_B`, `Z_antenna_A` e `Z_antenna_B`. O Código 7 apresenta uma versão simplificada da função `deltas_A_B` desenvolvida.

Código 7: Função `deltas_A_B`, simplificada.

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

Fonte: Autor.

A última função auxiliar desenvolvida foi `isoctave`, que confere se a corrente simulação está sendo executada no GNU Octave, retornando um valor binário e não recebe qualquer parâmetro. O Código 8 apresenta uma versão simplificada da função `isoctave` desenvolvida.

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_{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 θ_{AoA}. Seus

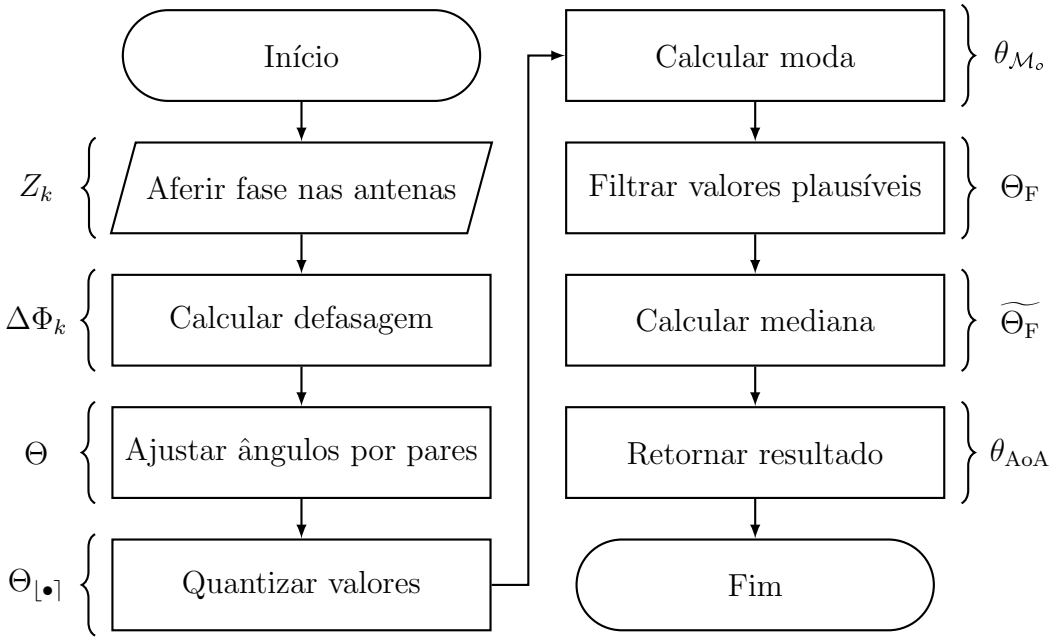
Código 8: Função `isoctave`, simplificada.

```
function r = isoctave ()
  persistent x;
  if (isempty (x))
    x = exist ('OCTAVE_VERSION', 'builtin');
  end
  r = x;
end
```

Fonte: Autor.

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 9 apresenta uma versão simplificada da função `calc_AoA` desenvolvida. A Figura 9 apresenta a sequências de operações realizadas pela função.

Figura 9: Fluxograma de operações da função `calc_AoA`.



Fonte: Autor.

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 θ_{AoA}. O segundo gráfico, à direita nas

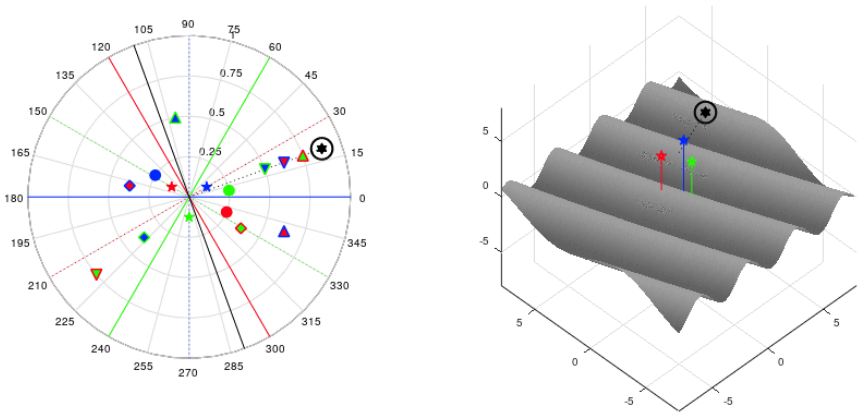
Código 9: Função `calc_AoA`, simplificada.

```
function return_struct = calc_AoA(...)
  Rho = d/(2*sin(pi / N_antenas));
  ant_angles = % ...
  ant_array = Rho * exp(i * deg2rad(ant_angles));

  Z_phase_array = arrayfun(@(a) phase_z(...), ant_array);
  [Z_x_array angle_Z_A_x_B_array] = arrayfun( ...
    @(a, b) dephase_A_to_B(a, b), ... );

  [delta_A_x_B delta_B_x_A] = arrayfun( ...
    @(ang, a, b) deltas_A_B(ang, a, b), ... );

  range_angle = pi/(2*(N_antenas+1));

  angle_vector = [delta_A_x_B delta_B_x_A];
  angle_vector = [...]; % Normalização

  angle_vector_round = ...
    round(angle_vector./range_angle).*range_angle;

  target_angle = mode(angle_vector_round);

  angle_vector = angle_vector(abs(target_angle ...
   - angle_vector) <= range_angle );

  choose_angle = median(angle_vector);

  return_struct = { ...
    choose_angle ...
    Rho ...
    ant_array ...
    Z_phase_array ...
    Z_x_array ...
    delta_A_x_B ...
    delta_B_x_A ...
  };

end %function
```

Fonte: Autor.

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 Figura 10 ilustra os gráficos gerados pela função `generate_fig`.

Figura 10: Exemplo de quadro da animação de saída da função `generate_fig`.



Fonte: Autor, saída gráfica disponível em GitHub.

3.1.5 Função geral da simulção

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`. Essa função também invoca a simulação do algoritmo de GN para as mesmas condições.

3.2 Simulação do Algoritmo de GN

Para análise comparatória, também foi desenvolvida uma simulação para o método de AoA utilizando o algoritmo de GN, adaptando a proposta de Schmidt e Hellbrück [23], referida na Seção 2.2. Nesta adaptação, cada receptor é formado por um par de antenas, separados pela mesma distância d utilizada na presente proposta, e o sistema como um todo utiliza N_{ant} receptores dispostos de maneira linear. Considerando que a presente análise é planar, a componente de terceira dimensão foi desconsiderada. O método realiza 5 iterações para convergir os resultados em cada ponto de análise.

O código desenvolvido está nos anexos, na Subseção A.2.5.

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, $\mathrm{SNR} \to \infty\,\mathrm{dB}$) ao caso de potência de ruído igual à potência de sinal ($\mathrm{SNR} = 0\,\mathrm{dB}$), 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.

Para cada simulação realizada, foi também realizada outra nas mesmas condições para o algoritmo de GN, adaptado da proposta de Schmidt e Hellbrück [23], referida na Seção 2.2. Em muitos casos, este método teve problema em convergir para um valor, apontando o erro de Número Indefinido ou Inválido (*Not a Number*, NaN), nestes casos, nenhum resultado de ângulo foi obtido. Nos resultados aqui sumarizados, são indicadas as porcentagens associadas a quantidade de valores válidos obtidos por este método, ou seja, que não retornaram NaN. No gráficos apresentados, pontos de θ_{GN} ausentes são referentes a estes erros.

Este método assume que a fonte do sinal estará a frente do plano de receptores, portanto apontará somente valores "positivos", de 0 a π, proporcionalmente espelhados caso a fonte esteja na direção contrária. Para medida de análise, estes valores foram considerados corretos, dado que consistem apenas numa mudança de referecial.

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 %.

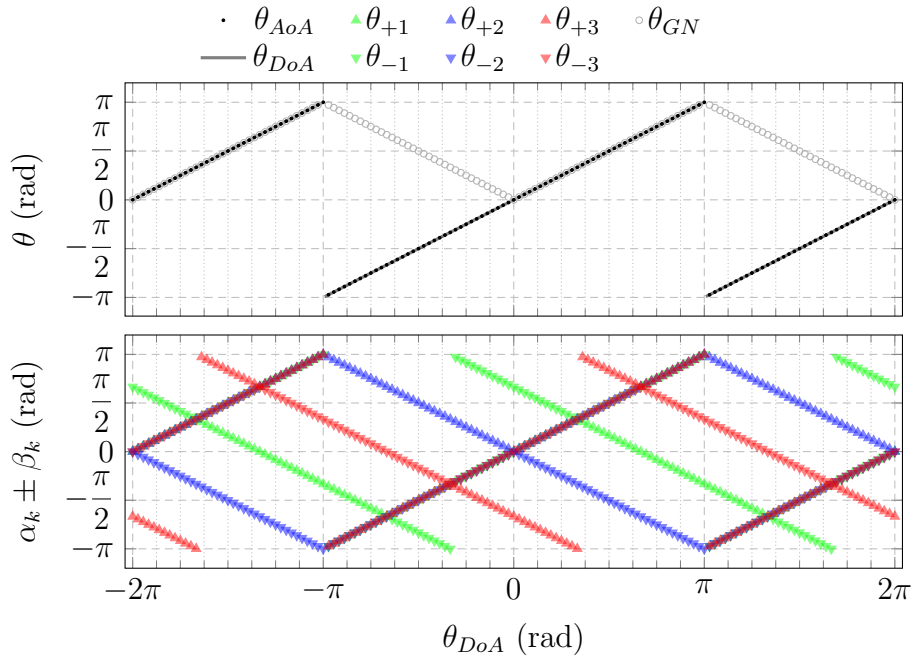
Simulações realizadas na configurações de três antenas têm os valores de R^2 apresentados na Tabela 1, e os resultados dos valores destacados são apresentados nas Figuras 11, 12 e 13.

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

SNR (dB)	Sem ATT			Com ATT		
	R^2 (%)	GN R^2 (%)	GN válidos (%)	R^2 (%)	GN R^2 (%)	GN válidos (%)
∞	**100,00**	**100,00**	98,62	100,00	100,00	100,00
20	88,78	0,23	84,14	95,85	2,25	86,90
17	82,09	0,26	86,90	89,95	3,44	86,90
14	96,10	0,13	88,28	97,83	0,03	83,45
7	78,56	1,61	88,28	92,02	1,39	88,97
0	**82,35**	**3,40**	86,90	**77,93**	**0,10**	85,52

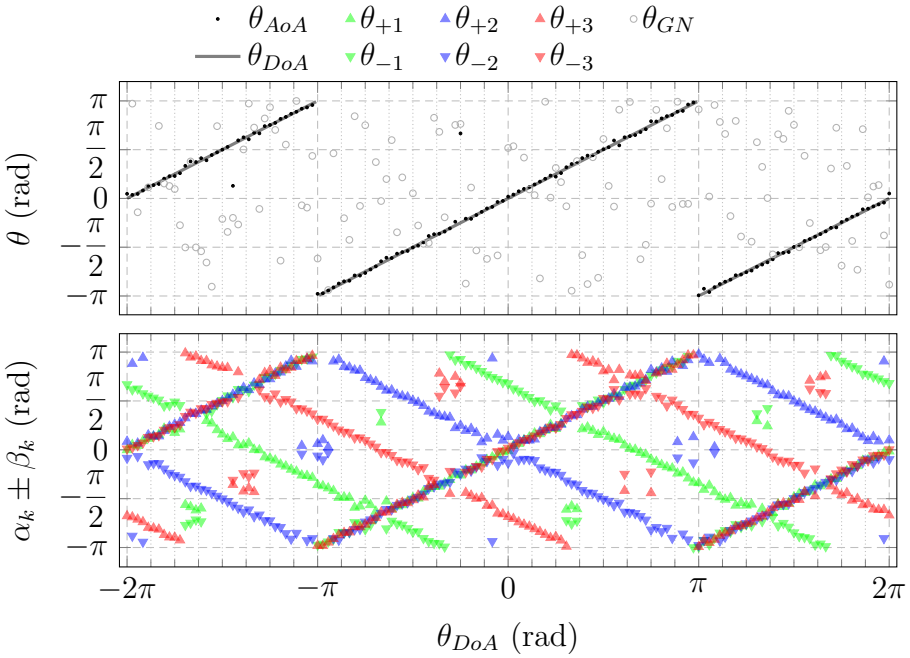
Fonte: Autor, saídas das simulações disponíveis em GitHub.

Figura 11: Simulação para três antenas, caso ideal (SNR $\to \infty$ dB).



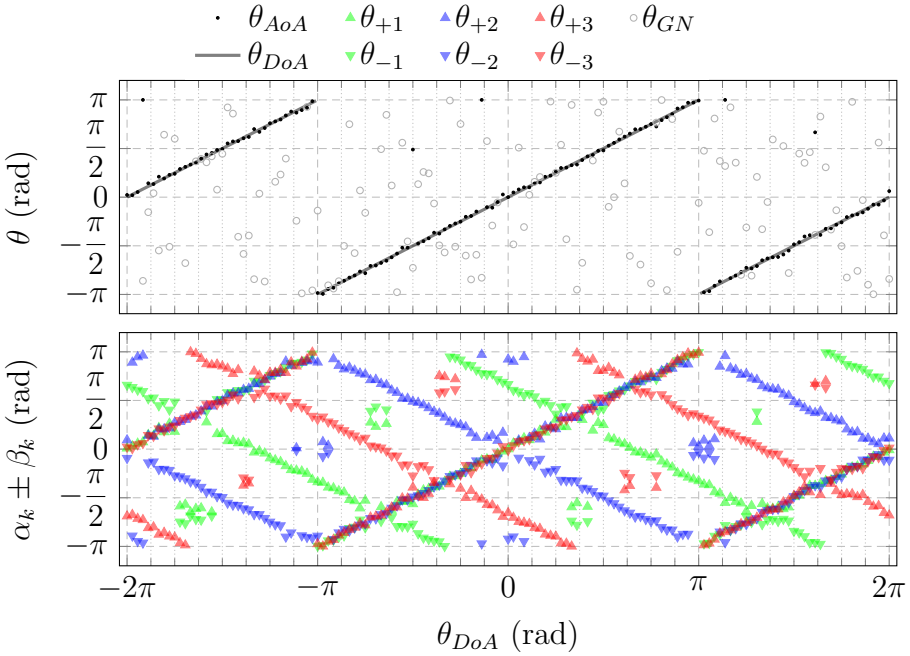
Fonte: Autor, saída gráfica disponível em GitHub.

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



Fonte: Autor, saída gráfica disponível em GitHub.

Figura 13: Simulação para três antenas, caso SNR = 0 dB, com atenuação.



Fonte: Autor, saída gráfica disponível em GitHub.

4.1.2 Cinco antenas

As simulações com cinco antenas apresentaram valores intermediários de R^2. Todos os valores foram acima de 75 %, e em média, acima de 80 %.

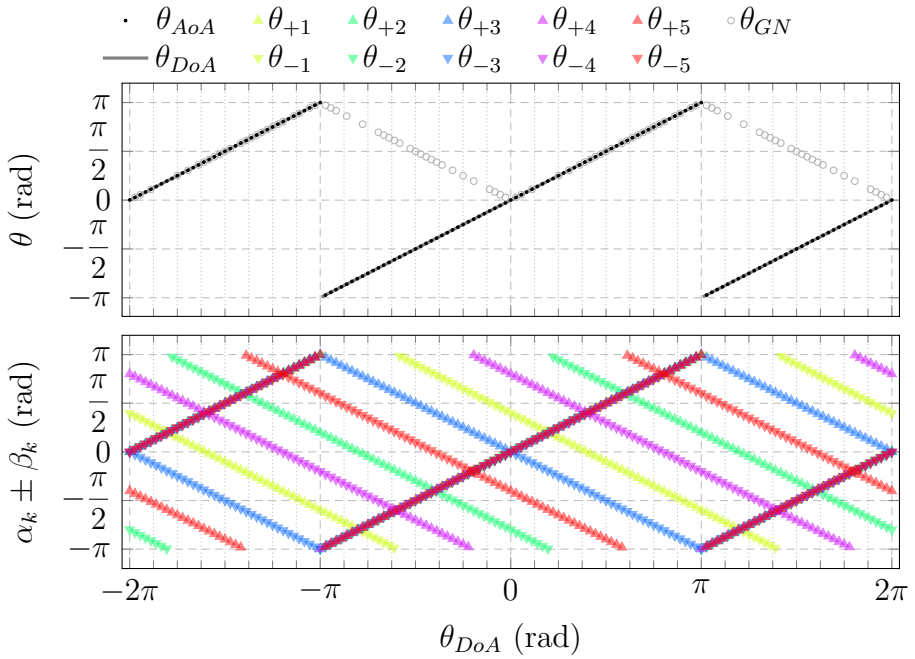
Simulações realizadas na configurações de cinco antenas têm os valores de R^2 apresentados na Tabela 2, e os resultados dos valores destacados são apresentados nas Figuras 14, 15 e 16.

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

SNR (dB)	Sem ATT			Com ATT		
	R^2 (%)	GN R^2 (%)	GN válidos (%)	R^2 (%)	GN R^2 (%)	GN válidos (%)
∞	**100,00**	**100,00**	67,59	100,00	100,00	70,34
20	100,00	19,79	24,83	100,00	13,56	22,76
17	100,00	7,50	20,69	91,90	0,04	20,69
14	84,26	0,75	23,45	84,24	0,03	24,14
7	99,99	0,93	21,38	99,99	0,06	15,86
0	**76,30**	**0,87**	22,07	**82,43**	**7,77**	16,55

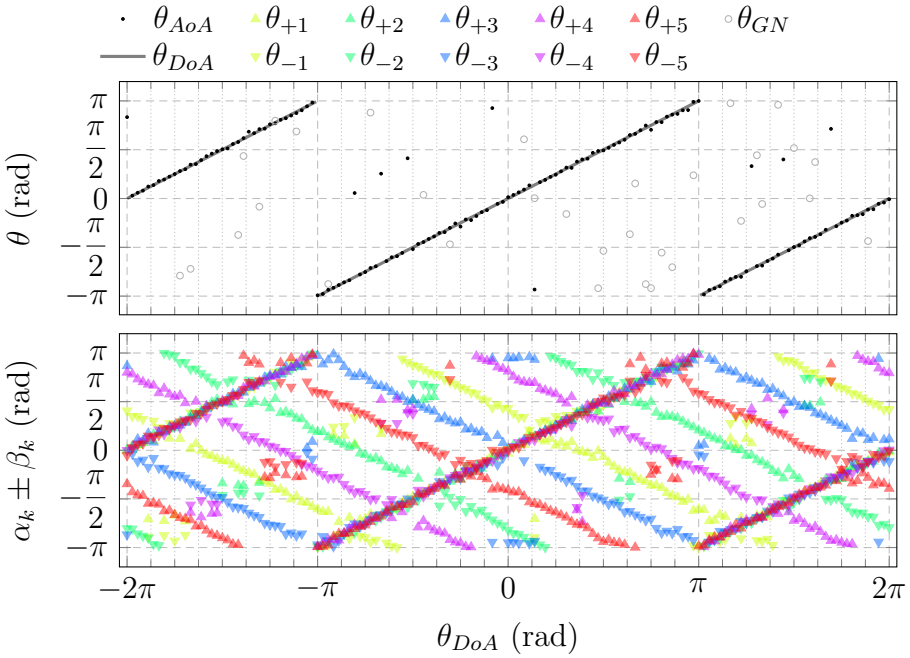
Fonte: Autor, saídas das simulações disponíveis em GitHub.

Figura 14: Simulação para cinco antenas, caso ideal (SNR $\to \infty$ dB).



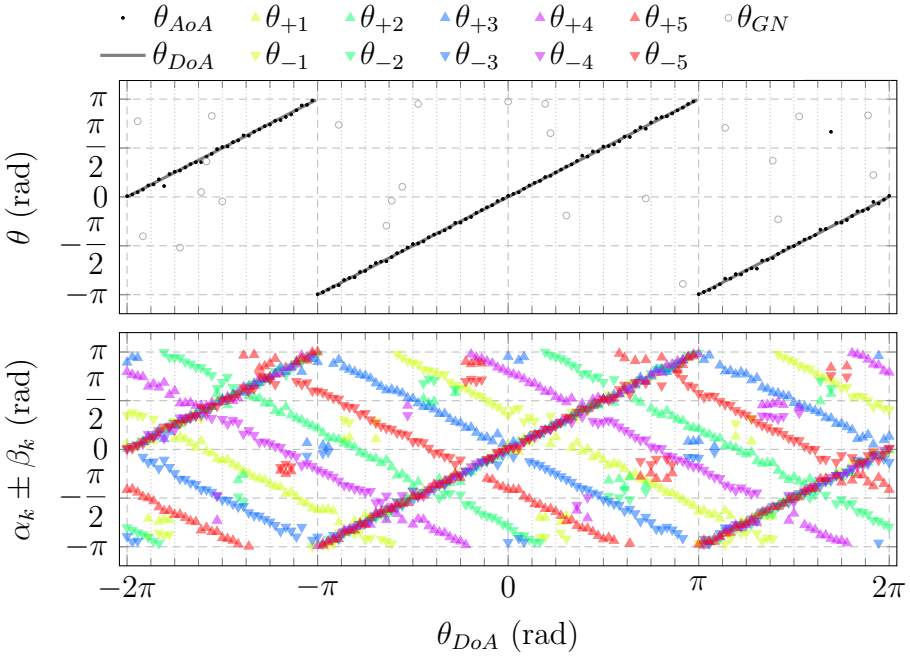
Fonte: Autor, saída gráfica disponível em GitHub.

Figura 15: Simulação para cinco antenas, caso SNR = 0 dB, sem atenuação.



Fonte: Autor, saída gráfica disponível em GitHub.

Figura 16: Simulação para cinco antenas, caso SNR = 0 dB, com atenuação.



Fonte: Autor, saída gráfica disponível em GitHub.

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 %.

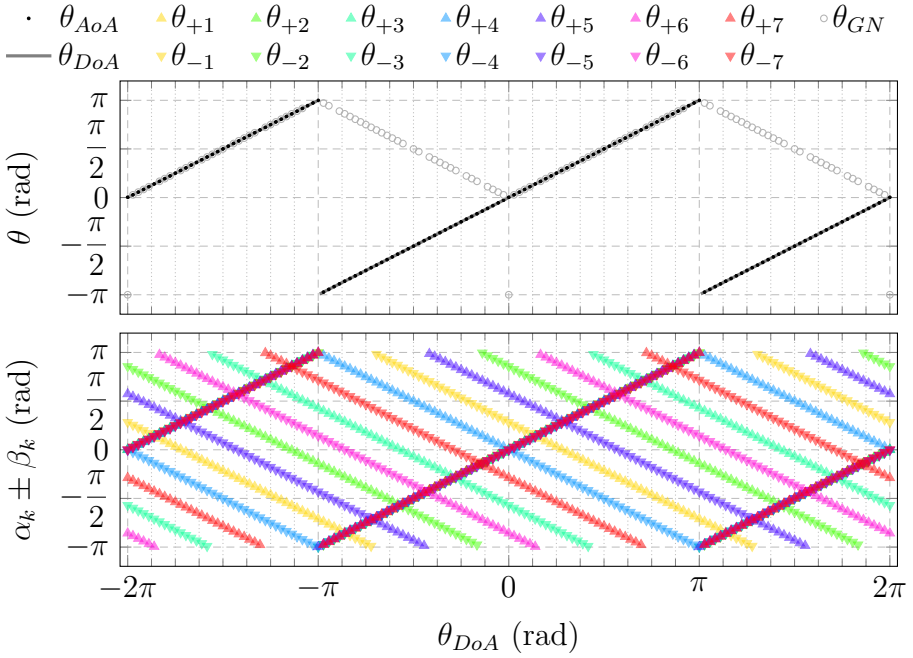
Simulações realizadas na configurações de sete antenas têm os valores de R^2 apresentados na Tabela 3, e os resultados dos valores destacados são apresentados nas Figuras 17, 18 e 19.

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

SNR (dB)	Sem ATT			Com ATT		
	R^2 (%)	GN R^2 (%)	GN válidos (%)	R^2 (%)	GN R^2 (%)	GN válidos (%)
∞	**100,00**	**82,53**	82,07	100,00	100,00	75,86
20	100,00	9,97	26,21	100,00	2,59	31,03
17	100,00	9,14	14,48	84,25	15,84	21,38
14	91,90	1,41	24,83	84,24	6,51	27,59
7	84,23	9,35	22,07	91,90	4,84	20,00
0	**91,86**	**7,95**	22,07	**84,20**	**0,14**	23,45

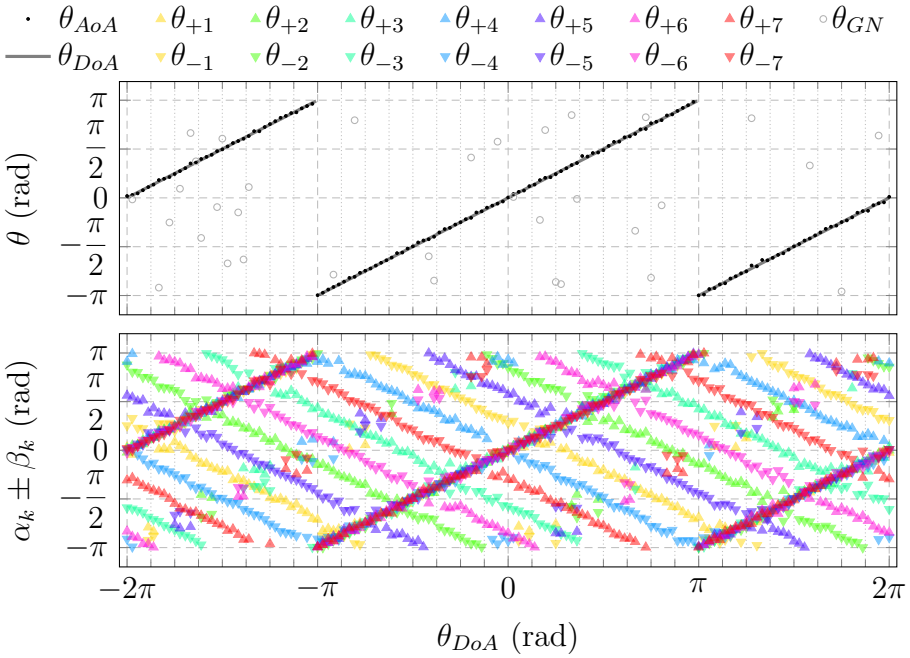
Fonte: Autor, saídas das simulações disponíveis em GitHub.

Figura 17: Simulação para sete antenas, caso ideal (SNR $\to \infty$ dB).



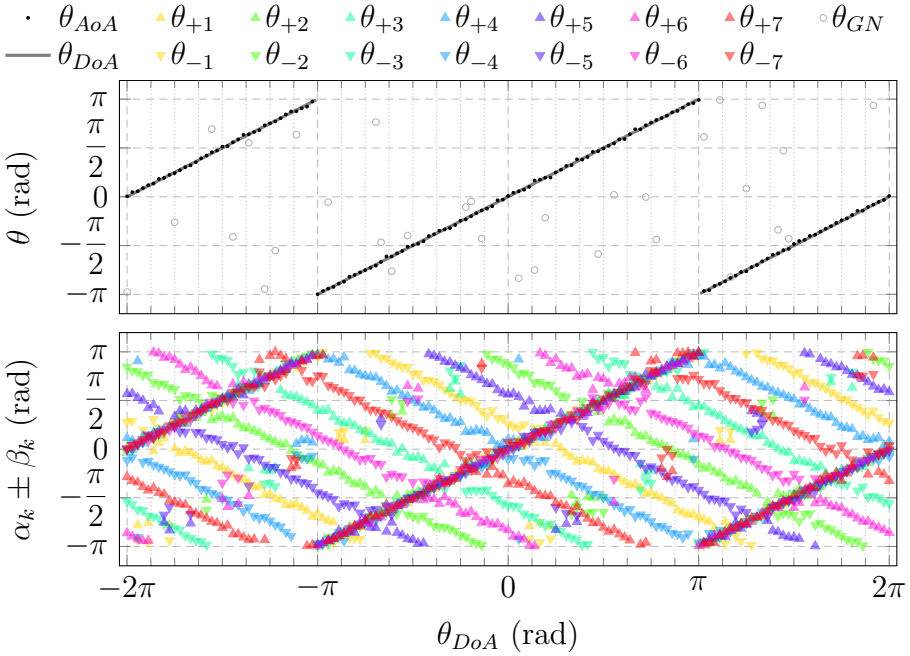
Fonte: Autor, saída gráfica disponível em GitHub.

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



Fonte: Autor, saída gráfica disponível em GitHub.

Figura 19: Simulação para sete antenas, caso SNR = 0 dB, com atenuação.



Fonte: Autor, saída gráfica disponível em GitHub.

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.

4.2.3 Convergência de valores

Em múltiplos casos, o algoritmo de GN não foi capaz de convergir para um valor, apontando problema de precisão numérica e retornando o erro NaN.

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.

Comparando com os resultados válidos do algoritmo de GN, os valores obtidos pelo sistema proposto se mostraram mais assertivos, particularmente em casos com ruído e atenuação. Possívelmente com mais iterações o algoritmo seria capaz de convegir para valores mais próximos aos corretos, porém os erros numéricos presentes podem ter corroborado com a divergência dos resultados.

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 no arranjo. 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.

[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.

[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.

[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.

[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. Schüssel, "Angle of Arrival Estimation using WiFi and Smartphones", 2016. endereço: 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 Positionning", 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.

[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.

[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/INFCOM.2003.1209196.

[23] S. O. Schmidt e H. Hellbrück, "Real-Time Bluetooth Low Energy Angle-of-Arrival Localization with Gauss-Newton", em *2025 First International Conference on Advances in Computer Science, Electrical, Electronics, and Communication Technologies (CE2CT)*, 2025, pp. 360–365. DOI: 10.1109/CE2CT64011.2025.10939545.

[24] Nir Krakauer, *Function Reference: awgn*, 2016. endereço: https://octave.sourceforge.io/communications/function/awgn.html.

[25] 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`.

```
EARTH_RADIUS = 6371E3;

                  % Lat          Lon
coord_ufabc_SA  = [-23.64450270 -46.52808340];
coord_ufabc_SBC = [-23.67751378 -46.56349172];

A = coord_ufabc_SA;
B = coord_ufabc_SBC;

theta_A = deg2rad(A(1));
theta_B = deg2rad(B(1));

phi_A = deg2rad(A(2));
phi_B = deg2rad(B(2));

delta_theta = theta_B - theta_A;
delta_phi = phi_B - phi_A;

X = cos(theta_B)*sin(delta_phi);
Y = cos(theta_A)*sin(theta_B) - sin(theta_A)*cos(theta_B)*
   cos(delta_phi);
Z = (sin(delta_theta/2))^2 + cos(theta_B) * cos(theta_A) *
    (sin(delta_phi/2))^2;

beta = atan2(X,Y) - pi/2;

if beta < -pi
  beta = beta + 2*pi
end

d = EARTH_RADIUS * 2 * atan2(sqrt(Z), sqrt(1 - Z))

d_deg = rad2deg(beta)
```

A.2 Simulação de AoA

A.2.1 Funções auxiliares

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

```
function res = argument_r( ... %
  x_w, ... % coordenada x associada ao ponto da antena
  y_w, ... % coordenada y associada ao ponto da antena
  t_w, ... % tempo t associado ao instante de afericao do
     sinal
  ang_w, ... % angulo theta de chegada do sinal em relacao
      ao sistema de antenas
  r_w, ... % distancia que o emissor de sinal está da
     coordenada (0,0) do sistema
  phase_w, ... % defasagem do sinal no emissor
  lambda_w, ... % comprimento de onda
  omega_w ... % frequencia angular
)

  r_0 = r_w * lambda_w;

  x_0 = r_0 * cos(ang_w);
  y_0 = r_0 * sin(ang_w);

  res = (2*pi/lambda_w) * ( sqrt((y_w-y_0).^2 + (x_w-x_0)
     .^2) ) + omega_w*t_w + phase_w;
end %function
```

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

```
function c = ref_cos( ...
  t_w, ... % tempo t associado ao instante de afericao do
     sinal
  omega_w ... % frequencia angular
) % Funcao auxiliar de sinal cosseno
  c = cos(argument_r(0, 0, t_w, 0, 0, 0, 1, omega_w));
end %function
```

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

```
function s = ref_sin( ...
  t_w, ... % tempo t associado ao instante de afericao do
     sinal
  omega_w ... % frequencia angular
) % Funcao auxiliar de sinal seno
  s = sin(argument_r(0, 0, t_w, 0, 0, 0, 1, omega_w));
end %function
```

Código 14: Arquivo de código signal_r.m.

```
function res = signal_r( ...
  x_w, ... % coordenada x associada ao ponto da antena
  y_w, ... % coordenada y associada ao ponto da antena
  t_w, ... % tempo t associado ao instante de afericao do
     sinal
  amp_w, ... % amplitude desejada para o sinal
  ang_w, ... % angulo theta de chegada do sinal em relacao
      ao sistema de antenas
  r_w, ... % distancia que o emissor de sinal esta da
     coordenada (0,0) do sistema
  phase_w, ... % defasagem phi do sinal
  lambda_w, ... % comprimento de onda
  omega_w, ... % frequencia angular
  S, ... % utilizacao de funcao Seno
  C, ... % utilizacao de funcao Cosseno
  NOISE, ... % se o sinal contara com ruido
  SNR_dB, ... % relacao sinal-ruido
  ATT ... % se o sinal contara com atenuacao por distancia
) % Funcao de sinal senoidal

  res = 0;
  if S
    res = res + sin( argument_r(x_w, y_w, t_w, ang_w, r_w,
        phase_w, lambda_w, omega_w) );
  end %if
  if C
    res = res + cos( argument_r(x_w, y_w, t_w, ang_w, r_w,
        phase_w, lambda_w, omega_w) );
  end %if
  if S && C
    res = res / sqrt(2);
  end %if

  if ATT
    %%% Lei de Friis
    G_t = 1; % Ganho Antena Tx
    G_r = 1; % Ganho Antena Rx
    %%% Potencia eletrica
    R_t = 1; % Resistencia Antena Tx (Reatância)
    R_r = 1; % Resistencia Antena Rx (Reatância)
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    P_t = (amp_w^2)/R_t;

    P_r = P_t * G_t * G_r * (lambda_w / (4 * pi * r_w));

    amp_r = sqrt(P_r * R_r);
```

```
    res = res * amp_r;
  else
    res = res * amp_w;
  end %if

  if NOISE
    res = awgn(res, SNR_dB, 'measured');
  end %if

end %function
```

Código 15: Arquivo de código phase_z.m.

```
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 ...
)
    % Calculos de amostra I/Q para antena em (0,0)
  I_medido = trapz(t,ref_cos(t, omega_w) ...
    .* signal_r(real(Z_antenna), imag(Z_antenna), t, ...
    amp_w, ang_w, r_w, phase_w, lambda_w, omega_w, ...
    S, C, NOISE, SNR_dB, ATT));
  Q_medido = trapz(t,ref_sin(t, omega_w) ...
    .* signal_r(real(Z_antenna), imag(Z_antenna), t, ...
    amp_w, ang_w, r_w, phase_w, lambda_w, omega_w, ...
    S, C, NOISE, SNR_dB, ATT));

  Z_phase = (omega_w/pi)*(I_medido + i*Q_medido);
end % function
```

Código 16: Arquivo de código dephase_A_to_B.m.

```
function [Z_phase_A_x_B angle_Z_A_x_B] = dephase_A_to_B(
   ...
  Z_phase_A, ...
  Z_phase_B ...
)
  Z_phase_A_x_B = Z_phase_A * conj(Z_phase_B);
  deltaPhi_A_x_B = angle(Z_phase_A_x_B);
```

```
  angle_Z_A_x_B = acos(deltaPhi_A_x_B/(pi));
end % function
```

Código 17: Arquivo de código deltas_A_B.m.

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

Código 18: Arquivo de código isoctave.m.

```
function r = isoctave() % Confere se esta executando no
   octave ou nao
  persistent x;
  if (isempty (x))
    x = exist ('OCTAVE_VERSION', 'builtin');
  end
  r = x;
end
```

A.2.2 Função de cálculo para AoA

Código 19: Arquivo de código calc_AoA.m.

```
function return_struct = calc_AoA( ...
  amp_w, ...
  ang_w, ...
  r_w, ...
  phase_w, ...
  lambda_w, ...
  omega_w, ...
  S, ...
  C, ...
  NOISE, ...
  SNR_dB, ...
  ATT, ...
  resolution, ...
  d, ...
  N_antenas ...
)

  % Raio do circulo de circunscreve o poligono com N lados
      de tamanho d
```

```
19  Rho = d/(2*sin(pi / N_antenas));
20  ant_angles_shift = -90;
21  ant_angles = (0 + ant_angles_shift):(360/N_antenas):(359
        + ant_angles_shift);
22
23  % Coordenadas das antenas
24  ant_array = Rho * exp(i * deg2rad(ant_angles));
25
26  t = linspace(0,(2 * pi / omega_w), resolution); %
        Intervalo de integração
27
28  % Calculos de fase
29  Z_phase_array = arrayfun(@(a) phase_z(t, a, amp_w, ...
30    ang_w, r_w, phase_w, lambda_w, omega_w, S, C, NOISE,
          ...
31    SNR_dB, ATT), ant_array);
32
33  % Calculos de simetria
34  [Z_x_array angle_Z_A_x_B_array] = arrayfun(@(a, b)
        dephase_A_to_B(a, b), ...
35    Z_phase_array, circshift(Z_phase_array,-1));
36
37  [delta_A_x_B delta_B_x_A] = arrayfun(@(ang, a, b)
        deltas_A_B(ang, a, b), ...
38    angle_Z_A_x_B_array, ant_array, circshift(ant_array
          ,-1));
39
40  % Fazer "votacao" de angulo escolhido
41  range_angle = pi/(2*(N_antenas+1));
42
43  angle_vector = [delta_A_x_B delta_B_x_A];
44  angle_vector = [...
45    (angle_vector(angle_vector<0)+(2*pi)) ...
46    (angle_vector(0<=angle_vector & angle_vector<=(2*pi)))
          ...
47    (angle_vector((2*pi)<angle_vector)-(2*pi)) ...
48  ]; % Normalizar vetor de angulos entre 0 e 2 pi
49
50  angle_vector_round = round(angle_vector./range_angle).*
        range_angle;
51  target_angle = mode(angle_vector_round);
52
53  angle_vector = angle_vector(abs(target_angle -
        angle_vector) <= range_angle ); % Descartar
        improvavei
54
55  choose_angle = median(angle_vector); % Calcular angulo
        provavel
```

```
56
57    return_struct = { ...
58      choose_angle ...
59      Rho ...
60      ant_array ...
61      Z_phase_array ...
62      Z_x_array ...
63      delta_A_x_B ...
64      delta_B_x_A ...
65    };
66
67  end %function
```

A.2.3 Função de geração saída visual

Código 20: 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
22   while length(color_list) < length(ant_array)
23     aux_color_list = normalize(color_list+circshift(
         color_list,1),'range');
24     color_list = sortrows(cat(1,color_list, aux_color_list
         .*0.75));
25   end %while
26
27   % Garantir maior contraste entre cores de antenas
28   color_index = floor(index_list * (length(color_list)/
       length(ant_array)));
29
```

```
30  AoA_x = cos(choose_angle);
31  AoA_y = sin(choose_angle);
32
33  DoA_x = cos(ang_w);
34  DoA_y = sin(ang_w);
35
36  set(0, 'defaultlinelinewidth', 0.5);
37  set(0, 'defaultlinemarkersize', 5);
38  set(0, 'defaultlinemarkerfacecolor', 'auto');
39
40  clf;
41
42  % Calcular a figura de fundo para visualizacao em imagem
43
44  subplot(1,2,2, 'align');
45  surf(x_w,y_w,z_plot); % Desenhar sinal eletromagnetico
46  view(-45, 45)
47
48  colormap('gray');
49  hold on;
50    % Desenhar antenas
51    for idx = index_list
52      ant = ant_array(idx);
53      color = color_list(color_index(idx),:);
54      plot3(real(ant)*[1 1], imag(ant)*[1 1], [-lambda_w
          lambda_w], '-p', 'color', color);
55    end % for
56
57    plot3([0 lambda_w]*AoA_x, [0 lambda_w]*AoA_y, [
        lambda_w lambda_w],':k');
58    plot3(lambda_w*AoA_x, lambda_w*AoA_y, lambda_w,'hk');
59
60    % Angulo de chegada real
61    plot3(DoA_x*lambda_w, DoA_y*lambda_w, lambda_w, 'ok',
        'markerfacecolor', 'none', 'markersize', 10, '
        linewidth', 1);
62
63    shading interp;
64    axis([-interval interval -interval interval -interval
        interval],'square')
65    caxis([-lambda_w lambda_w]);
66  hold off;
67
68  subplot(1,2,1, 'align');
69
70  interval_2d = 1.25*lambda_w;
71  axis([-interval_2d interval_2d -interval_2d interval_2d
      ],'square')
```

```
72
73    if isoctave()
74      polar(0,0,':w')
75    else
76      polarplot(0,0,':w')
77    end % if
78
79    hold on;
80    if isoctave()
81      set( gca, 'rtick', [ 0 : 0.25 : 1 ] );
82      set( gca, 'ttick', [ 0  : 15 : 359 ] );
83    else % MATLAB
84      rticks([ 0 : 0.25 : 1 ]);
85      thetaticks([ 0  : 15 : 359 ]);
86    end %if
87
88    grid on;
89    grid minor;
90
91    for idx = index_list
92      idx_next = idx+1;
93      if idx_next > length(ant_array)
94        idx_next = 1;
95      end %if
96      color = color_list(color_index(idx),:);
97      color_next = color_list(color_index(idx_next),:);
98      part_ang_r = 8 + (12-8)*(idx-1)/(length(ant_array)-1);
99
100     % Antenas
101     ant = ant_array(idx);
102     ant_plot_aux = ant/(8 * Rho);
103     if isoctave()
104       plot(real(ant_plot_aux), imag(ant_plot_aux), 'p', '
            color', color);
105     else % MATLAB
106       polarplot(angle(ant_plot_aux), abs(ant_plot_aux), 'p
            ', 'color', color);
107     end % if
108
109     % Fase por antena
110     Z_phase = Z_phase_array(idx);
111     Z_phase_plot_aux = Z_phase/abs(Z_phase)*(4/16);
112     if isoctave()
113       plot(real(Z_phase_plot_aux), imag(Z_phase_plot_aux),
            'o', 'color', color);
114     else % MATLAB
115       polarplot(angle(Z_phase_plot_aux), abs(
            Z_phase_plot_aux), 'o', 'color', color);
```

```
116     end % if
117
118     % Eixos auxiliares
119     ant_next = ant_array(idx_next);
120     ant_axis = ant_next - ant;
121     if isoctave()
122       plot(real(ant_axis)*[1 -1]/abs(ant_axis), imag(
            ant_axis)*[1 -1]/abs(ant_axis), '-', 'color',
            color);
123       plot(real(ant_axis*i)*[1 -1]/abs(ant_axis), imag(
            ant_axis*i)*[1 -1]/abs(ant_axis), ':', 'color',
            color);
124     else % MATLAB
125       polarplot(angle(ant_axis), [1 -1], '-', 'color',
            color);
126       polarplot(angle(ant_axis*i), [1 -1], ':', 'color',
            color);
127     end % if
128
129     % Defasagem entre antenas
130     Z_A_x_B = Z_x_array(idx);
131     aux_A_x_B = (Z_A_x_B/abs(Z_A_x_B))*(6/16);
132     if isoctave()
133       plot(real(aux_A_x_B), imag(aux_A_x_B), 'd', 'color',
             color, 'markerfacecolor', color_next, 'linewidth
            ', 0.75);
134     else % MATLAB
135       polarplot(angle(aux_A_x_B), abs(aux_A_x_B), 'd', '
            color', color, 'markerfacecolor', color_next, '
            linewidth', 0.75);
136     end % if
137
138     % Angulos de chegada parciais
139     delta_A_x_B = delta_A_x_B_array(idx);
140     delta_B_x_A = delta_B_x_A_array(idx);
141     if isoctave()
142       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);
143       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);
144     else % MATLAB
145       polarplot(delta_A_x_B, part_ang_r/16, 'v', 'color',
            color, 'markerfacecolor', color_next, 'linewidth'
            , 0.75);
```

```
146         polarplot(delta_B_x_A, part_ang_r/16, '^', 'color',
                color, 'markerfacecolor', color_next, 'linewidth'
                , 0.75);
147       end % if
148     end % for
149
150     if isoctave()
151       % Angulo de chegada calculado
152       plot([0 7/8]*AoA_x, [0 7/8]*AoA_y,':k');
153       plot(7/8*AoA_x, 7/8*AoA_y,'hk', 'markersize', 10, '
              linewidth', 1);
154       cplx_aux_AoA = i*exp(i*choose_angle);
155       plot(real(cplx_aux_AoA)*[1 -1], imag(cplx_aux_AoA)*[1
              -1],'-k');
156
157       % Angulo de chegada real
158       plot(DoA_x*7/8, DoA_y*7/8,'ok', 'markerfacecolor', '
              none', 'markersize', 15, 'linewidth', 1);
159     else % MATLAB
160       % Angulo de chegada calculado
161       polarplot([choose_angle choose_angle], [0 7/8],':k');
162       polarplot(choose_angle, 7/8,'hk', 'markersize', 10, '
              linewidth', 1);
163       cplx_aux_AoA = choose_angle + pi/2;
164       polarplot([cplx_aux_AoA cplx_aux_AoA], [1 -1],'-k');
165
166       % Angulo de chegada real
167       polarplot(ang_w, 7/8,'ok', 'markerfacecolor', 'none',
              'markersize', 15, 'linewidth', 1);
168     end % if
169
170     hold off;
171
172 end % function
```

A.2.4 Função geral da simulção

Código 21: 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, ...
```

```
    N_antenas ...
)

    function ang_norm = normalize_angle(ang)
      ang_norm = ang;
      if ang > pi
        ang_norm = ang_norm - (2*pi);
      end % if
      if ang < -pi
        ang_norm = ang_norm + (2*pi);
      end % if
    end % function

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    DEBUG = false;

    SNR_dB = 10*log10(SNR);

    phase = 0;

    R_upper = 50;
    R_lower = 1;

    range_shift = 0;

    DoA_range = (0+range_shift):range_step:(360+range_shift
       -1);
    DoA = deg2rad(DoA_range);

    limits = 2; % -+ * Lambda

    c = 1; % Velocidade da luz, simplificacao
    lambda = 4;
    omega = 2*pi*c/lambda;
    d = lambda / 2;
    T = 2 * pi / omega;

    amp_0 = 1;

    C = true;
    S = true;

    interval = limits*lambda;
    resolution = 100;

    space = linspace(-interval,interval,resolution+1); % 1-
       by-100
```

```
57  [x, y] = meshgrid(space);
58  t_0 = 0;
59
60  ant_idx_list = 1:1:N_antenas;
61  ant_idx_list_shift = circshift(ant_idx_list, 1);
62
63  name = 'simul';
64  folder = '';
65
66  name = [name '_POLY_' num2str(N_antenas)];
67  folder = [folder 'POLY_' num2str(N_antenas)];
68
69  if CHG_R
70    name = [name '_R_' num2str(R_upper) '~' num2str(
        R_lower) ];
71  else
72    name = [name '_R_' num2str(R_upper)];
73  end %if
74  if ~CHG_THETA
75    name = [name '_FIXED_W'];
76  end %if
77  if NOISE
78    name = [name '_SNR_' num2str(SNR)];
79  end %if
80  if ATT
81    name = [name '_ATT'];
82  end %if
83
84  if (S_GIF || S_DAT)
85    foldername = fullfile('Output', folder);
86    if not(isfolder(foldername))
87      mkdir(foldername);
88    end %if
89    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', '
          Position', [1 1 1000 500]);
100   else % MATLAB
101     f = figure('name', name, 'visible', 'off', 'Position
          ', [1 1 1000 500]);
```

```
102     end % if
103
104   else
105     f = figure('name', name);
106   end %if
107
108   if S_DAT
109     dat_file = fopen(dat_filename, 'w');
110     fprintf(dat_file, '%s', 'percent');
111     fprintf(dat_file, '\t%s', 'ang_W');
112     fprintf(dat_file, '\t%s', 'r');
113     fprintf(dat_file, '\t%s', 'phase');
114     fprintf(dat_file, '\t%s', 'choose_angle');
115     fprintf(dat_file, '\t%s', 'choose_angle_GN');
116     for i = ant_idx_list
117       fprintf(dat_file, '\t%s%d_x_%d', 'delta_', i,
            ant_idx_list_shift(i));
118     end % for
119     for i = ant_idx_list
120       fprintf(dat_file, '\t%s%d_x_%d', 'delta_',
            ant_idx_list_shift(i), i);
121     end % for
122     fprintf(dat_file, '\n');
123     if isoctave()
124       fflush(dat_file);
125     end %if
126   end % if
127
128   DoA_loop_range = [DoA_range DoA_range 360]; % Duas
        voltas
129
130   percent = 0;
131   ref_iteration = 1/(length(DoA_loop_range)-1);
132   it = 0;
133   DelayTime = 15*ref_iteration;
134   r = R_upper+R_lower;
135
136   P_b_estimado = [0, 0];
137
138   for DoA = DoA_loop_range
139     it = it + 1;
140
141     fprintf('%.2f%% -> %s\n', percent*100, name);
142
143     if CHG_PHI
144       phase = phase + 2*pi*ref_iteration;
145     end %if
146
```

```
147     if CHG_R
148       r = r - R_upper/(2*length(DoA_range));
149     end %if
150
151     if CHG_THETA
152       ang_W = deg2rad(DoA);
153     else
154       ang_W = pi*5/12;
155     end %if
156
157     return_struct = calc_AoA(amp_0, ang_W, r, phase,
            lambda, ...
158       omega, S, C, NOISE, SNR_dB, ATT, resolution, d,
            N_antenas);
159
160     [ ...
161       choose_angle, ...
162       Rho, ...
163       ant_array, ...
164       Z_phase_array, ...
165       Z_x_array, ...
166       delta_A_x_B, ...
167       delta_B_x_A, ...
168     ] = return_struct{:};
169
170     return_struct = gauss_newton(amp_0, ang_W, r, phase,
            lambda, ...
171       omega, S, C, NOISE, SNR_dB, ATT, resolution, d,
            N_antenas, it, P_b_estimado);
172
173     [ ...
174       choose_angle_GN, ...
175       P_b_estimado ...
176     ] = return_struct{:};
177
178     % Calcular a figura de fundo para visualizacao em
            imagem
179     z_plot = signal_r(x, y, t_0, amp_0, ang_W, r, phase,
            ...
180       lambda, omega, S, C, NOISE, SNR_dB, ATT);
181
182     generate_fig( ...
183       z_plot, ...
184       x, ...
185       y, ...
186       ang_W, ...
187       lambda, ...
188       interval, ...
```

```
189         Rho, ...
190         choose_angle, ...
191         ant_array, ...
192         Z_phase_array, ...
193         Z_x_array, ...
194         delta_A_x_B, ...
195         delta_B_x_A ...
196       )
197
198       drawnow;
199
200       if true
201       elseif S_GIF
202         frame = getframe(f);
203         im = frame2im(frame);
204
205         [imind, cm] = rgb2ind(im);
206         % [imind, cm] = rgb2ind(RGB, im); % MATLAB
207         if it == 1
208           % Create GIF file
209           if isoctave()
210             imwrite(imind, cm, gif_filename,'gif','DelayTime
                ', DelayTime , 'Compression' , 'lzw');
211           else % MATLAB
212             imwrite(imind, cm, gif_filename,'gif','DelayTime
                ', DelayTime);
213           end % if
214         else
215           % Add each new plot to GIF
216           if isoctave()
217             imwrite(imind, cm, gif_filename,'gif','WriteMode
                ','append','DelayTime', DelayTime , '
                Compression' , 'lzw');
218           else
219             imwrite(imind, cm, gif_filename,'gif','WriteMode
                ','append','DelayTime', DelayTime); % MATLAB
220           end % if
221         end %if
222       else
223         % pause(1/30)
224         pause(0.0001)
225       end %if
226
227       if S_DAT
228         fprintf(dat_file, '%.2f', percent*100);
229         fprintf(dat_file, '\t%.3f', normalize_angle(ang_W));
230         fprintf(dat_file, '\t%.3f', r);
231         fprintf(dat_file, '\t%.3f', normalize_angle(phase));
```

```
232         fprintf(dat_file, '\t%.3f', normalize_angle(
               choose_angle));
233         fprintf(dat_file, '\t%.3f', normalize_angle(
               choose_angle_GN));
234
235         for i = ant_idx_list
236           fprintf(dat_file, '\t%.3f', normalize_angle(
                 delta_A_x_B(i)));
237         end % for
238         for i = ant_idx_list
239           fprintf(dat_file, '\t%.3f', normalize_angle(
                 delta_B_x_A(i)));
240         end % for
241
242         fprintf(dat_file, '\n');
243         if isoctave()
244           fflush(dat_file);
245         end %if
246       end % if
247
248       percent = percent + ref_iteration;
249
250     end %for
251
252     if S_GIF
253       fprintf('Check: %s\a\n', gif_filename);
254     end %if
255
256     if S_DAT
257       fclose(dat_file);
258       fprintf('Check: %s\a\n', dat_filename);
259     end %if
260
261 end %function
```

A.2.5 Função do algoritmo de Gauss-Newton

Código 22: Arquivo de código `gauss_newton.m`.

```
1  function return_struct = gauss_newton( ...
2    amp_w, ...
3    ang_w, ...
4    r_w, ...
5    phase_w, ...
6    lambda_w, ...
7    omega_w, ...
8    S, ...
9    C, ...
10   NOISE, ...
```

```
    SNR_dB, ...
    ATT, ...
    resolution, ...
    d, ...
    N_antenas, ...
    it, ...
    P_b_estimado ...
)

    % Distancia entre pares de Locators
    Rho = d/(2*sin(pi / N_antenas));

    % Posicao Locators
    locator_pair = [ -(d/2) (d/2) ];

    N_pairs_alt = floor(N_antenas/2);

    x_L = (-N_pairs_alt:N_pairs_alt)';

    y_L = zeros(size(x_L));
    aux_ones = ones(size(x_L));
    aux_ant_array = x_L + (aux_ones * locator_pair);

    ant_matrix = aux_ant_array;

    t = linspace(0,(2 * pi / omega_w), resolution); %
        Intervalo de integração

    for iteration = 1:5

      % % Calculos de fase
      Z_phase_matrix = arrayfun(@(a) phase_z(t, a, amp_w,
          ...
        ang_w, r_w, phase_w, lambda_w, omega_w, S, C, NOISE,
            ...
        SNR_dB, ATT), ant_matrix);

      [Z_x_L phi_L] = arrayfun(@(a,b) dephase_A_to_B(a, b),
          Z_phase_matrix(:,2), Z_phase_matrix(:,1));

      % Posicao_B lido
      % Coordenada X do emissor em relação ao sistema
      x_B = (y_L(2) - y_L(1) + tan(phi_L(1)) * x_L(1) - tan(
          phi_L(2)) * x_L(2)) / (tan(phi_L(1)) - tan(phi_L(2)
          ));

      % Coordenada Y do emissor em relação ao sistema
      y_B = y_L(1) - tan(phi_L(1)) * (x_L(1) - x_B);
```

```
53
54      % Componente Z desconsiderada
55      % z_B
56
57      if iteration == 1
58        P_b_estimado = [x_B, y_B];
59      end % if
60
61      phi_medido = atan2((y_L-y_B),(x_L-x_B));
62
63      phi_estimado = atan2((y_L-P_b_estimado(2)),(x_L-
          P_b_estimado(1)));
64
65      A = (phi_medido - phi_estimado);
66
67      function res = phi_dxB(x_L, x_B, y_L, y_B)
68        res = (y_L - y_B)./(-2 .* x_L .* x_B + x_B.^2 + (y_L
            - y_B).^2 + x_L.^2);
69      end % function
70
71      function res = phi_dyB(x_L, x_B, y_L, y_B)
72        res = (x_B - x_L)./(-2 .* x_L .* x_B + x_B.^2 + (y_L
            - y_B).^2 + x_L.^2);
73      end % function
74
75      % arrayfun(@(a,b) dephase_A_to_B(a, b), Z_phase_matrix
          (:,1), Z_phase_matrix(:,2));
76      Jacobiano = [ phi_dxB(x_L, P_b_estimado(1), y_L,
          P_b_estimado(2)) ...
77        phi_dyB(x_L, P_b_estimado(1), y_L, P_b_estimado(2))
            ];
78
79      deltas = (inv(Jacobiano * Jacobiano') * Jacobiano)' *
          A;
80
81      P_b_estimado(1) = P_b_estimado(1) + deltas(1);
82      P_b_estimado(2) = P_b_estimado(2) + deltas(2);
83
84      choose_angle = angle(P_b_estimado(1) + i *
          P_b_estimado(2));
85
86    end % for
87
88    return_struct = { ...
89      choose_angle, ...
90      P_b_estimado ...
91      % Rho ...
92      % ant_array ...
```

```
93      % Z_phase_array ...
94      % Z_x_array ...
95      % delta_A_x_B ...
96      % delta_B_x_A ...
97    };
98
99  end %function
```

A.2.6 Arquivos de simulação em sequência

Código 23: 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    false, ... % NOISE
12    false, ... % ATT
13    true, ... % CHG_PHI
14    false, ... % CHG_R
15    false, ... % CHG_THETA
16    true, ... % S_GIF
17    true, ... % S_DAT
18    1/1, ... % SNR
19    5, ... % range_step
20    9 ... % N_antenas
21    );
```

Código 24: 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_antenas = 3;
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);
```

Código 25: Arquivo 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 = 3;
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);
```