



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Estimação da direção de chegada e da posição de VANTs (Veículos Aéreos Não-Tripulados) por meio de arranjo de antenas direcionais

Victor Araujo Dantas

Monografia apresentada como requisito parcial
para conclusão do Curso de Engenharia da Computação

Orientador

Prof. Dr. Rafael Timóteo de Sousa Júnior

Coorientador

Dr. Ricardo Kehrle Miranda

Brasília
2020



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Estimação da direção de chegada e da posição de VANTs (Veículos Aéreos Não-Tripulados) por meio de arranjo de antenas direcionais

Victor Araujo Dantas

Monografia apresentada como requisito parcial
para conclusão do Curso de Engenharia da Computação

Prof. Dr. Rafael Timóteo de Sousa Júnior (Orientador)
ENE/UnB

do Curso de Engenharia da Computação

Brasília, 8 de Julho de 2020

Dedicatória

Dedico este trabalho, de todo o meu coração, aos meus pais Jailson e Regina e ao meu irmão Gabriel.

Agradecimentos

Agradeço primeiro a Deus e à minha família, pois foi o suporte deles que me deu forças durante todo o processo de graduação. Agradeço em especial ao meu pai e à minha mãe que sempre se preocuparam com o meu bem-estar, sempre me motivaram a me tornar minha melhor versão e sempre acreditaram no meu potencial mesmo em momentos que eu duvidei de mim. Agradeço ao meu irmão por ser um exemplo, cuidar e estar sempre disponível para ajudar nas diversas situações da minha vida como também durante a minha graduação. Agradeço ao meu coorientador Ricardo Kehrlé por toda a paciência, cuidado e principalmente disponibilidade que mesmo à distância separou tempo para me atender da melhor maneira. Agradeço ao meu orientador professor Rafael Timóteo por todo suporte e disponibilidade. Também gostaria de agradecer aos meus colegas de trabalho da Agência Nacional de Aviação Civil que sempre me deixaram confortável para conciliar minha graduação com o meu trabalho e sempre me trataram com carinho e cuidado. E também quero agradecer aos amigos que fiz durante essa caminhada e tornaram ela mais leve e prazerosa. Em especial quero agradecer ao Gabriel Pinheiro e ao Iure Brandão que sempre estiveram disponíveis para me apoiar seja em relação aos muitos trabalhos e tarefas que realizamos durante a graduação ou até em situações pessoais, obrigado por demonstrar o valor da amizade. Por último, não poderia deixar de agradecer a todos os professores, pois sem eles não seria possível chegar aqui.

Victor Araujo Dantas

Resumo

Em decorrência do aumento do uso de VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) aumentou-se o risco da manipulação errada desses veículos, como por exemplo uso em locais com aglomeração de pessoas ou nas proximidades de aeroportos, além da possibilidade de uso ilegal, tal como manuseio em presídios para fins ilícitos. A área de estudo de estimação de direção de chegada e da posição do emissor mostra-se importante para atenuação dos riscos da manipulação errada de VANTs. Em estudos anteriores, o método utilizado para estimação da direção de chegada foi a utilização da potência do sinal recebido (do inglês: RSS - Received Signal Strength) em conjunto com o uso de geometria platônica sólida e posterior aplicação do algoritmo MUSIC (Multiple Signal Classification).

O projeto em tela tem como objetivo propor uma técnica simplificada de Estimação de Direção de Chegada (do inglês: DoA - Direction of Arrival Estimation) para sinais emitidos por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) por meio do uso de arranjos de antenas, além da estimação da posição do VANT emissor do sinal. A técnica de estimação da direção de chegada proposta nesse projeto utiliza a potência do sinal recebido, porém de forma mais simplificada, associada ao ganho de diretividade, que é uma característica própria da antena escolhida como receptora do sinal. A primeira técnica de estimação da posição proposta se baseia no uso de dois arranjos idênticos de antenas direcionais e na interseção dos pontos correspondentes à estimação de direção de chegada de cada arranjo de antena. Outra técnica de estimação de posição proposta baseia-se na triangulação da estimação da direção de chegada de quatro arranjos de antenas direcionais dispostos como vértices de um quadrilátero.

Palavras-chave: Estimação da direção de chegada, estimação da posição, potência de sinal recebido, triangulação

Abstract

The use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) has increased the risk of misuse of these vehicles, such as in crowded places or near airports, and the possibility of illegal use, such as in prisons for illicit purpose. The direction of arrival estimation and position estimation are two important fields of study that make possible the mitigation of the risks of incorrect handling of UAVs. In previous studies, the estimation of the direction of arrival occurred by the use of the received signal strength (RSS - Received Signal Strength) along with solid platonic geometry and subsequent application of the MUSIC (Multiple Signal Classification) algorithm.

A simplified direction of arrival (DoA) estimation technique for signals emitted by Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) through the use of antenna array, moreover the estimation of the position of the UAV is proposed in this project. The direction of arrival estimation technique proposed uses the received signal strength, although in a more simplified way, associated with the directivity gain, which is a characteristic of the antenna that will receive the signal. The first technique proposed to estimate the position of the emitter use two identical antenna arrays and the intersection point corresponding to the estimation of the direction of arrival of each antenna array. A different technique to estimate the position of an emitter is the triangulation of the DoA estimation of four directional antenna arrays. These antenna arrays represent each vertice of the quadrilateral in which the emitter is within.

Keywords: Direction of arrival estimation, position estimation, received signal strength, triangulation

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivo do Trabalho	2
1.3	Organização do Documento	3
2	Estimação de DoA e Posição Propostos	4
2.1	Introdução	4
2.1.1	Estimação da Direção de Chegada	4
2.1.2	Estimação da Posição	6
2.2	Modelo de Estimação da Direção de Chegada	7
2.2.1	Modelo de Dados	7
2.2.2	Estado da Arte	8
2.2.3	Técnica Aplicada	9
2.3	Modelo de Estimação da Posição	10
2.3.1	Estimação da Posição para Dois Arranjos de Antenas	10
2.3.2	Estimação da Posição para Quatro Arranjos de Antenas	12
3	Simulações e Análise dos Resultados	15
3.1	Introdução	15
3.2	Simulação da Estimação da Direção de Chegada	15
3.2.1	Análise dos Resultados para Dois Arranjos de Antenas	17
3.2.2	Análise dos Resultado para Quatro Arranjos de Antenas	22
3.3	Simulação da Estimação da Posição do Emissor	27
3.3.1	Análise dos Resultado para Dois Arranjos de Antenas	29
3.3.2	Análise dos Resultado para Quatro Arranjos de Antenas	34
4	Conclusão e Próximos Passos	39
	Referências	42

Lista de Figuras

1.1	Aeroporto invadido por drone.	2
2.1	Sinal de onda agindo sobre arranjo de antenas com ângulo de chegada θ	5
2.2	Apresentação do modelo de arranjo de antenas direcionais e um transmissor com ângulo de chegada θ	7
2.3	Representação gráfica da interseção das retas que passam pelos arranjos de antenas e definem o a posição P do emissor.	11
2.4	Representação gráfica da triangulação para estimação da posição do emissor do sinal.	13
3.1	Padrão de ganho de diretividade das antenas simuladas.	16
3.2	(a) Resposta de potência espacial para cada arranjo de antenas para dois arranjos e (b) Resposta de potência espacial para cada arranjo de antenas para quatro arranjos.	17
3.3	(a) RMSE das estimações da direção de chegada do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas 1 e (b) para o arranjo de antenas 2.	18
3.4	(a) RMSE das estimações da direção de chegada do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas 1 e (b) para o arranjo de antenas 2.	19
3.5	(a) RMSE das estimações da direção de chegada do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas 1 e (b) para o arranjo de antenas 2.	20
3.6	(a) RMSE das estimações da direção de chegada do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas 1 e (b) para o arranjo de antenas 2.	21
3.7	(a) RMSE das estimações da direção de chegada do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas 1, (b) para o arranjo de antenas 2, (c) para o arranjo de antenas 3 e (d) para o arranjo de antenas 4.	23

3.8	(a) RMSE das estimações da direção de chegada do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas 1, (b) para o arranjo de antenas 2, (c) para o arranjo de antenas 3 e (d) para o arranjo de antenas 4.	24
3.9	(a) RMSE das estimações da direção de chegada do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas 1, (b) para o arranjo de antenas 2, (c) para o arranjo de antenas 3 e (d) para o arranjo de antenas 4.	26
3.10	Estimação da Posição para dois arranjos de antenas por meio da interseção de retas.	28
3.11	Estimação da Posição para quatro arranjos de antenas por meio da triangulação de retas.	29
3.12	(a) RMSE das estimações da posição do emissor do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas e (b) pontos que representam as posições simuladas do emissor.	30
3.13	(a) RMSE das estimações da posição do emissor do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas e (b) pontos que representam as posições simuladas.	31
3.14	(a) RMSE das estimações da posição do emissor do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas e (b) pontos que representam as posições simuladas do emissor.	32
3.15	(a) RMSE das estimações da posição do emissor do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas e (b) pontos que representam as posições simuladas do emissor.	33
3.16	(a) RMSE das estimações da posição do emissor do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas e (b) pontos que representam a posição real do emissor.	35
3.17	(a) RMSE das estimações da posição do emissor do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas e (b) pontos que representam a posição real do emissor.	36
3.18	(a) RMSE das estimações da posição do emissor do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas e (b) pontos que representam a posição real do emissor.	37

Lista de Tabelas

3.1	Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo e arranjo de antenas referente para o intervalo $x = [25, \dots, 26]$ e $y = [20, \dots, 21]$	18
3.2	Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo e arranjo de antenas referente para o intervalo $x = [15, \dots, 30]$ e $y = [20, \dots, 40]$	19
3.3	Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo e arranjo de antenas referente para o intervalo $x = [-15, \dots, 45]$ e $y = [20, \dots, 60]$	20
3.4	Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo e arranjo de antenas referente para o intervalo $x = [-30, \dots, 60]$ e $y = [20, \dots, 100]$	21
3.5	Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo e arranjo de antenas referente para o intervalo $x = [25, \dots, 26]$ e $y = [20, \dots, 21]$	23
3.6	Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo e arranjo de antenas referente para o intervalo $x = [15, \dots, 25]$ e $y = [15, \dots, 25]$	25
3.7	Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo e arranjo de antenas referente para o intervalo $x = [5, \dots, 35]$ e $y = [5, \dots, 35]$	26
3.8	Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo para o intervalo $x = [25, \dots, 26]$ e $y = [20, \dots, 21]$	30
3.9	Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo para o intervalo $x = [15, \dots, 30]$ e $y = [20, \dots, 40]$	31
3.10	Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo para o intervalo $x = [-15, \dots, 45]$ e $y = [20, \dots, 60]$	32
3.11	Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo para o intervalo $x = [-30, \dots, 60]$ e $y = [20, \dots, 100]$	33

- 3.12 Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo para o intervalo $x = [25, \dots, 26]$ e $y = [20, \dots, 21]$. 35
- 3.13 Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo para o intervalo $x = [15, \dots, 25]$ e $y = [15, \dots, 25]$. 36
- 3.14 Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo para o intervalo $x = [5, \dots, 35]$ e $y = [5, \dots, 35]$. . 37

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Com o avanço da tecnologia relacionada aos VANTs (também conhecidos como drones), que possibilitou o desenvolvimento de produtos mais simples e com custos mais baixos para o consumidor final, e o fato de não ser necessária nenhuma habilitação específica para a manipulação de drones mais simples para alturas menores, o uso desses veículos se tornou popular. Devido à facilidade de manipulação e diminuição do esforço humano por meio do uso de drones, esses veículos passaram a ser utilizados em diversos setores, tais como indústria, na fertilização de grandes plantações, comércio, no transporte de cargas e mercadorias para os clientes e dentro dos galpões, militar, em missões de reconhecimento e supervisão de missões, e uso pessoal, como por exemplo para fotografia. A utilização de drones nesses setores pode ser exemplificada no uso para fotografia aérea (jornalismo ou cinema), entregas expressas, compilação de informações ou suprimentos essenciais na gestão de crises, drones com sensores térmicos para operações de busca e resgate, mapeamento geográfico, inspeção de construções, transporte de cargas, controle de fronteira, rastreamento de tempestades e previsão de tornados [1].

Porém, do aumento do uso desse novo recurso decorre o aumento do risco da manipulação de VANTs ocasionar algum acidente ou de que ocorra uso com propósitos ilícitos tais como o uso para transporte de bens ilegais para dentro ou para fora de presídios. Diversos acidentes podem ocorrer devido ao manuseio de drones em áreas próximas a aeroportos, dentro das áreas restritas como pode-se perceber na Figura 1.1, ou com aglomeração de pessoas. Em 2017, um drone colidiu com uma aeronave em rota de pouso no aeroporto de Quebec [2]. Também em 2017, um drone, que estava voando fora dos limites de visão do operador, colidiu com um helicóptero militar americano em Nova Iorque [3]. Ainda em 2017, um drone se aproximou do espaço aéreo do aeroporto de Congonhas, em São Paulo, fazendo com que cerca de 35 voos que iriam aterrissar fossem alternados para

outros aeroportos [4]. Em setembro de 2019, dois voos foram alternados do aeroporto de Dubai por causa do manuseio de drones nas proximidades do espaço aéreo do aeroporto [5].

Tanto no incidente em Quebec como no incidente em Nova Iorque não houve feridos e as aeronaves pousaram com sucesso, porém ocasionaram danos nas aeronaves. Incidentes envolvendo VANTs geram consequências com custos altos, como por exemplo no incidente em Congonhas no qual o prejuízo causado foi de mais de 1 milhão de reais, pois podem gerar a perda do equipamento, necessidade de manutenção e troca de peças de aeronaves atingidas e pagamento de indenizações a companhias aéreas, passageiros e empresas privadas [6].

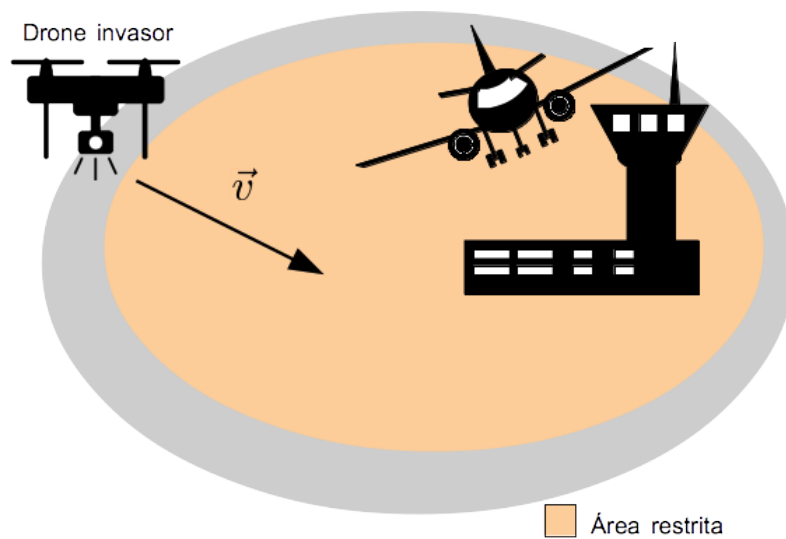


Figura 1.1: Aeroporto invadido por drone.

1.2 Objetivo do Trabalho

Este trabalho visa aplicar a técnica de estimação da direção de chegada baseada na potência do sinal recebido (do inglês: RSS - Received Signal Strength), para um sistema de antenas de baixo custo, *off-the-shelf*, sem calibração de *hardware*, apresentada em [7] e [8], adaptando-a para que seja possível estimar a direção de chegada de uma fonte em dois arranjos de antenas direcionais e, também em quatro arranjos de antenas direcionais. Tem-se como objetivo, também, a estimação da posição do transmissor do sinal por meio do uso de dois arranjos de antenas e o ponto de interseção da estimação da direção de chegada em cada arranjo e a estimação da posição por meio do uso de quatro arranjos de antenas, aplicando a técnica de detecção e localização de emissores no interior de arranjos de múltiplos sensores apresentada em [9].

A utilização desse modelo simplifica o algoritmo proposto, pois leva em consideração apenas a potência do sinal recebido em cada elemento do arranjo de antenas e seu respectivo padrão de ganho de diretividade. Vale ressaltar que a simplificação do modelo, com o uso da potência do sinal recebido (RSS), consiste na não utilização da geometria platônica sólida [10] utilizada em estudos que embasaram esse trabalho.

1.3 Organização do Documento

Este trabalho está organizado da seguinte maneira. O Capítulo 2, apresenta e detalha os modelos de estimação de direção de chegada, tanto o que representa o estado da arte nesse campo de estudo como o modelo proposto em [7], que utiliza apenas um arranjo de antenas, adaptado para o uso em diversos arranjos de antenas direcionais. Além disso, apresenta o modelo de estimação da posição da fonte do sinal com o uso de dois arranjos de antenas e também o modelo de estimação da posição do emissor com o uso de quatro antenas, baseado no modelo de triangulação proposto em [9].

O Capítulo 3, apresenta os resultados das simulações para a estimação da direção de chegada baseada no modelo proposto em [7], porém aplicada para o caso de dois arranjos de antenas direcionais receptores e, posteriormente, para o caso de quatro arranjos de antenas direcionais receptores. Além disso, apresenta os resultados das simulações para a estimação da posição do emissor, tanto para o modelo que utiliza dois arranjos de antenas direcionais como para o modelo que utiliza quatro arranjos de antenas direcionais. Por último, o Capítulo 4 apresenta as conclusões do projeto, além dos trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estimação de DoA e Posição Propostos

2.1 Introdução

Neste Capítulo serão descritos e detalhados os modelos propostos de estimação da direção de chegada para diversos arranjos de antenas e de estimação da posição do emissor do sinal. Serão apresentados, para a estimação da direção de chegada, o modelo estado da arte e o modelo proposto, com a adaptação que utiliza diversos arranjos de antenas. Já para a estimação da posição será apresentada a técnica que utiliza dois arranjos de antenas e a técnica que utiliza quatro arranjos de antenas.

Este capítulo está assim dividido. Nesta Seção introdutória, 2.1, serão apresentados os conceitos de estimação da direção de chegada e de estimação da posição do emissor. Na Seção 2.2, será apresentado o modelo estado da arte de estimação de direção de chegada e o modelo proposto de estimação com o uso de diversos arranjos de antenas direcionais. Na Seção 2.3 serão apresentados e detalhados os modelos de estimação de posição com dois e quatro arranjos de antenas direcionais, respectivamente.

2.1.1 Estimação da Direção de Chegada

Estimação da Direção de Chegada (DoA: Direction of Arrival) é definida como a estimação da direção de chegada de sinais, sejam sinais eletromagnéticos (como por exemplo ondas de rádio) ou ondas acústicas, percebidas por um sensor ou um arranjo de antenas [11]. A necessidade da estimação da direção de chegada surge para que se facilite a localização e rastreamento de sinais tanto em situações militares como civis, como por exemplo na busca e resgate, sonares, sismologia e localização de chamadas de emergência [11]. A Figura 2.1 mostra um sinal de onda chegando em um arranjo de antenas com ângulo θ .

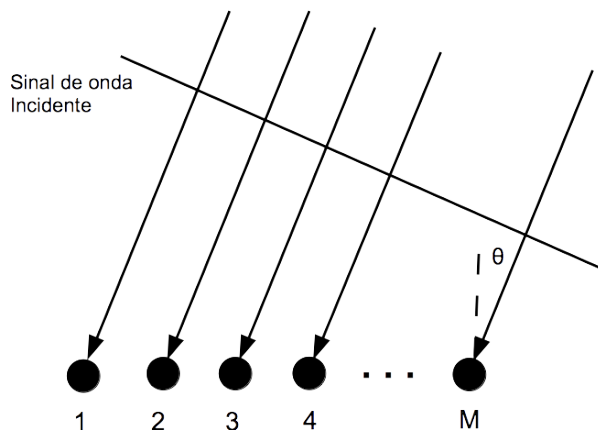


Figura 2.1: Sinal de onda agindo sobre arranjo de antenas com ângulo de chegada θ .

Algoritmos de estimação da direção de chegada são, normalmente, utilizados em conjunto com antenas inteligentes. Uma antena inteligente é um sistema que combina elementos diversos de uma antena convencional com capacidade de processamento de sinal que otimiza, automaticamente, os padrões de emissão ou recepção dos sinais do sistema [11].

Existem diversos algoritmos de estimação da direção de chegada que podem ser divididos em dois grandes grupos, os que se baseiam na fase do sinal e os que se baseiam na potência ou amplitude do sinal. Entre as técnicas que aplicam a fase do sinal, destacam-se os algoritmos que utilizam técnicas de *Beamforming*, *Maximum Likelihood* e aquelas *Subspace-Based*. Contudo, para fins de simplificação utilizou-se para este trabalho um modelo baseado na técnica de estimação de direção de chegada que aplica a potência ou amplitude do sinal.

A técnica de *Beamforming* (formação de colunas) representa uma das pioneiras na solução do problema de localização automática de emissores de sinais por meio do uso de arranjo de antenas. A ideia que caracteriza a técnica se baseia em posicionar o arranjo em uma direção específica a cada intervalo de tempo. A direção do arranjo na qual se percebe a máxima potência é, então, avaliada como a direção de chegada estimada [12].

Maximum Likelihood (Probabilidade Máxima) é, também, uma das primeiras técnicas de estimação de direção de chegada. Essa técnica buscar recompor, de uma cadeia de dados recebidos, os componentes do sinal original por meio diversos parâmetros, desses os que mais se aproximam dos componentes do sinal original são avaliados como a estimação da direção de chegada [13].

A técnica baseada em subespaços caracteriza-se por explorar a auto-estrutura (*eigen-structure*) dos dados de entrada ou da matriz de covariância. O algoritmo MUSIC (*Multiple Signal Classification*) foi vanguardista na utilização da estrutura da matriz de dados de entrada para os casos de arranjos de geometria arbitrária. A técnica ESPRIT (*Estima-*

tion of Signal via Rotational Invariance Techniques) baseia-se em subespaços e é aplicada a arranjos com estruturas invariantes em deslocamento [14].

A técnica de estimação da direção de chegada que utiliza a potência do sinal recebido (RSS: *Received Signal Strength*) funciona por meio da comparação entre a informação de RSS do sinal do emissor e do padrão de ganho de diretividade da antena receptora e por isso não requer *hardware* especial [15]. Essa técnica aplicada a situações nas quais dispõem-se de múltiplas antenas direcionais estáticas dispostas em diferentes direções simplifica a detecção da direção quando comparada com as técnicas anteriormente descritas [16].

Diversos trabalhos que tratam de sistemas que utilizam antenas direcionais foram desenvolvidos para fins diferentes e associam a potência de sinal recebido e antenas direcionais. Em [17] os autores apresentam um sistema simples, distribuído, eficiente, confiável, preciso e de baixo custo de localização por meio de nó ancorador móvel equipado com uma antena direcional e um receptor GPS para redes de sensores sem fio.

Em [18] os autores propõem um novo esquema de localização (RAL: *Rotatable Antenna Localization*) para nódulos de sensores que localizam eles mesmos em uma rede de sensor sem fio ao receber sinais de antenas direcionais rotacionais de dois nódulos âncora. No estudo realizado em [19] o autor apresenta um modelo para localização de nódulos de sensor estático aleatoriamente dispostos em um sistema de coordenadas bidimensional por meio de nódulos de ancoragem equipados com antenas direcionais.

Em [20] os autores integram o conceito de ângulo de chegada (AoA: *Angle of Arrival*) e localização baseada no indicador da potência de sinal recebido (RSSI: *Received Signal Strength Indicator*) para redução de erros e apresentam um novo modelo de localização, chamado ALRD (*AoA Localization with RSSI Differences*), para estimar o ângulo de chegada em 0.1 segundo ao comparar os valores indicados de potência de sinal recebido em duas antenas direcionais dispostas no mesmo lugar orientadas perpendicularmente. Em [21], os autores propõem teoria de amostragem de potência de sinal recebido para tratar do problema de amostragem com antenas direcionais rotacionais.

2.1.2 Estimação da Posição

Estimação da posição é definida como a detecção e localização das coordenadas do emissor do sinal por um receptor por meio do uso da triangulação. Um sistema de detecção e localização baseado em arranjos com múltiplas antenas é crucial para o posicionamento de nódulos em muitas aplicações tais como autenticação de usuários de uma rede e localização de nódulos em redes de sensores sem fio [9].

Desenvolveram-se diversos trabalhos que propõem soluções que utilizam técnicas de direção de chegada e triangulação para localização de usuários de rede sem fio [9]. Em [22], os autores apresentam uma solução que utiliza componentes presentes em sistemas de co-

municação sem fio MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) para estimação da localização do usuário por meio da estimação da direção de chegada.

No trabalho realizado em [23], os autores propõem um algoritmo de localização baseado na similaridade do vetor de potência do sinal recebido (RSSI: *Received Signal Strength Indicator*). Em [24] os autores apresentam um algoritmo de localização, que utiliza triangulação, baseado na lei dos cossenos.

2.2 Modelo de Estimação da Direção de Chegada

Nesta Seção será descrito o modelo utilizado para a estimação da direção de chegada, apresentado em [7]. Para isto, serão apresentados o modelo de dados, do qual derivou-se a técnica utilizada, o estado da arte e o modelo aplicado neste trabalho que será utilizado para dois arranjos de antenas e para quatro arranjos de antenas.

2.2.1 Modelo de Dados

Este modelo de dados é apresentado para o modelo aplicado, descrito em [8]. Na figura 2.2 apresenta-se o modelo do arranjo de antenas direcionais utilizado para este projeto. Serão utilizadas quatro antenas direcionais idênticas com espaçamento angular entre elas representado por ϕ , a perturbação desse espaçamento é representada por σ_ϕ e a direção de chegada do emissor do sinal é representado por θ .

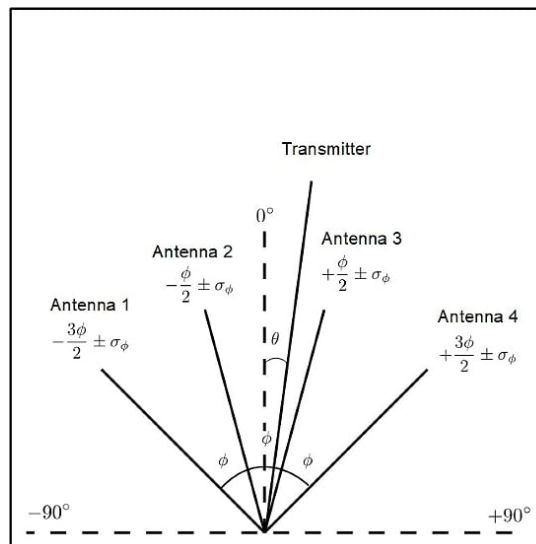


Figura 2.2: Apresentação do modelo de arranjo de antenas direcionais e um transmissor com ângulo de chegada θ .

Como descrito na Subseção 2.1.1, este trabalho utiliza a potência de sinal recebida em cada antena do arranjo a fim de obter a estimação da direção de chegada. A Equação de transmissão de Friis [25] determina que a potência do sinal recebido em uma antena, $P_{rx}(\theta)$, com padrão de ganho de diretividade $g(\theta)$ pode ser representada por:

$$P_{rx}(\theta) = P_{tx} + G_{tx} + g(\theta) + 20 \log_{10}\left(\frac{c}{4\pi Rf}\right), \quad (2.1)$$

onde P_{tx} é a potência de transmissão, G_{tx} é o ganho de transmissão, c a velocidade da luz, R a distância entre o emissor e o receptor do sinal e f a frequência de transmissão.

Com isso, obtemos um vetor que acumula os valores obtidos de potência do sinal recebido para as quatro antenas do arranjo, descrito como $p_{rx}(\theta)$ representado por:

$$p_{rx}(\theta) = [P_{1,rx} \ \dots \ P_{4,rx}]^T + \mathbf{n}, \quad (2.2)$$

onde $P_{i,rx}$, $i = 1, \dots, 4$ é a potência de sinal recebido na antena i e $\mathbf{n} = [n_1 \ \dots \ n_4]^T$ é um vetor que contém ruído com distribuição $\mathcal{N}(0, \sigma_{r_{ss}}^2)$.

O ganho de diretividade $g(\theta)$ de uma antena do arranjo é obtida por meio da especificação do fornecedor do modelo de antena direcional utilizada (para as simulações o padrão utilizado será o das antenas Yagi-Uda), então, o padrão de ganho de diretividade para o arranjo composto pelas quatro antenas é representado por:

$$g(\theta) = [g(\theta + \phi_1) \ \dots \ g(\theta + \phi_4)]^T, \quad (2.3)$$

onde $\phi_i = (i - 1)\phi - \frac{(3\phi)}{2}$, $i = 1, \dots, 4$.

2.2.2 Estado da Arte

O trabalho apresentado em [10] descreve de forma analítica e experimental o desempenho de um protótipo de antena otimizada para funcionar em 2.45 GHz - a fim de possibilitar a estimação da direção de chegada de um emissor de sinal. Para a implementação da solução de antena que permite a estimação da direção de chegada, os autores utilizaram seis elementos direcionais pentagonais dispostos em uma geometria de sólidos platônicos - essa geometria foi selecionada pois sólidos platônicos possuem faces e ângulos diédricos idênticos.

Para a estimação da direção de chegada, a solução descrita em [10] utiliza a potência do sinal recebido medido em cada elemento da antena. Para remover a dependência da potência de transmissão do sinal incidente, realiza-se a diferença entre a potência do sinal recebido em dois elementos distintos da antena. Isso é feito baseado na equação 2.1 - que é a equação de transmissão de Friis [25].

Ao se considerar que não há distância considerável entre os elementos da antena e que o emissor do sinal está posicionado a uma distância igual dos elementos, todos os termos da equação 2.1 são iguais para os dois elementos, exceto o padrão de ganho de diretividade de cada componente da antena, neste caso $g(\theta + \phi)$. Então, para dois elementos da antena teremos as seguintes equações que descrevem a potência do sinal recebido:

$$P_{i,rx}(\theta) = P_{tx} + G_{tx} + g(\theta + \phi_i) + 20 \log_{10}\left(\frac{c}{4\pi Rf}\right), \quad (2.4)$$

$$P_{j,rx}(\theta) = P_{tx} + G_{tx} + g(\theta + \phi_j) + 20 \log_{10}\left(\frac{c}{4\pi Rf}\right), \quad (2.5)$$

Subtraindo as equações 2.4 e 2.5, obtém-se uma expressão que mantém apenas o padrão de ganho de cada elemento:

$$P_{i,rx}(\theta) - P_{j,rx}(\theta) = g(\theta + \phi_i) - g(\theta + \phi_j), \quad (2.6)$$

ou seja, as dependências de P_{tx} , potência de transmissão, G_{tx} , ganho de transmissão, c , velocidade da luz, R , distância entre o emissor e o receptor do sinal, e f , frequência de transmissão, são removidas.

Para a estimação final da direção de chegada, os autores em [10] aplicam o algoritmo MUSIC (*Multiple Signal Classification*).

2.2.3 Técnica Aplicada

Em [7], é apresentada a técnica de estimação de direção de chegada utilizada neste trabalho. Esta técnica estima a direção de chegada calculando a potência de sinal recebido em cada antena do arranjo e avalia a diferença entre elas, tomadas duas a duas. A direção de chegada estimada é obtida por meio da comparação entre a diferença das potências de sinal recebido e o padrão de ganho do arranjo.

Em [7], os autores, primeiramente, definem a matriz $P(\theta) \in \mathbb{R}^{M \times M}$ - onde M é o número de antenas do arranjo - que armazena os valores de todas as possíveis diferenças de potência de sinal recebido:

$$[P(\theta)]_{i,j} = \begin{cases} P_{i,rx}(\theta) - P_{j,rx}(\theta), & \text{se } i < j, \\ 0, & \text{para qualquer outro caso,} \end{cases} \quad (2.7)$$

Depois, os autores definem a matriz $G(\theta) \in \mathbb{R}^{M \times M}$, de maneira similar:

$$[G(\theta)]_{i,j} = \begin{cases} g_i(\theta) - g_j(\theta), & \text{se } i < j, \\ 0, & \text{para qualquer outro caso,} \end{cases} \quad (2.8)$$

onde $g_k = g(\theta + \phi_k)$, $i = 1, \dots, 4$ para este projeto.

Para este trabalho foram utilizadas as formas vetorizadas de $P(\theta)$ e $G(\theta)$ da seguinte forma:

$$p(\theta) = \text{vec}(P(\theta)), \quad (2.9)$$

$$g(\theta) = \text{vec}(G(\theta)), \quad (2.10)$$

onde $\text{vec}(\cdot)$ é um operador que define um vetor a partir de uma matriz. Vale observar que para a técnica proposta em [7] são desconsiderados os elementos que possuem valor zero.

Depois, os autores calculam a resposta espacial $P(\theta)$ que carrega a informação de onde está a direção de chegada e é obtida a partir da comparação entre o vetor das diferenças de potência do sinal recebido e do vetor das diferenças do padrão de ganho do arranjo da seguinte maneira:

$$P(\theta) = \frac{1}{\|g(\theta) - p(\theta)\|_2^2}, \quad (2.11)$$

Então, o argumento máximo de $P(\theta)$ será considerado como a direção de chegada estimada $\hat{\theta}$ e é obtido por meio da maximização do resultado obtido na equação 2.11:

$$\hat{\theta} = \text{argmax}(P(\theta)). \quad (2.12)$$

2.3 Modelo de Estimação da Posição

Nesta Seção serão descritos os modelos utilizados para a estimação da posição do emissor do sinal. Será descrito, na Subseção 2.3.1, o modelo aplicado para a estimação da posição com o uso de dois arranjos de antenas e, na Subseção 2.3.2 o modelo aplicado para a estimação da posição com o uso de quatro arranjos de antenas - baseado na técnica de localização por meio da triangulação apresentada em [9].

2.3.1 Estimação da Posição para Dois Arranjos de Antenas

Nesta subseção é apresentado o método para a estimação da posição do emissor utilizando dois arranjos com quatro antenas idênticas cada. A posição é estimada por meio da utilização da direção de chegada $\hat{\theta}$, estimada em cada arranjo de antenas, obtida a partir do modelo descrito na subseção 2.2.3, em conjunto com os pontos que representam as

coordenadas nas quais se encontram estes arranjos, a fim de se obter as equações das retas que passam pelos dois arranjos de antenas e tornar possível a determinação do ponto de interseção entre as duas retas. A Figura 2.3 representa de forma gráfica as retas que passam pelos arranjos de antenas; a partir da interseção destas retas torna-se possível a definição das coordenadas x e y do ponto P , que representa a posição cartesiana estimada do emissor.

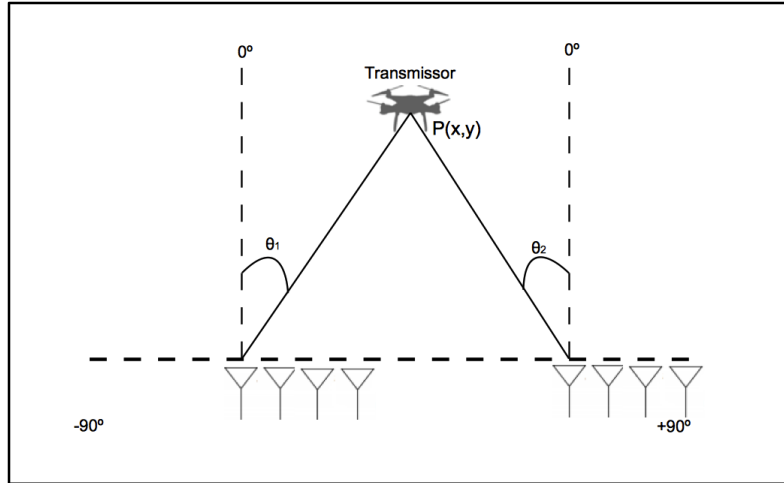


Figura 2.3: Representação gráfica da interseção das retas que passam pelos arranjos de antenas e definem o a posição P do emissor.

Primeiro, determinam-se as estimações da direção de chegada do emissor, $\hat{\theta}_1$ e $\hat{\theta}_2$, para os dois arranjos por meio da técnica de estimação da direção de chegada baseada na potência do sinal recebido descrita em [7]. Depois, são definidas as retas formadas pelas coordenadas dos pontos onde se encontram os arranjos de antenas e os ângulos $\hat{\theta}_1$ e $\hat{\theta}_2$ estimados. Para definir a equação da reta que passa por um arranjo foi utilizada a equação fundamental:

$$y - y_0 = \tan(\theta)(x - x_0), \quad (2.13)$$

onde (x_0, y_0) são as coordenadas do ponto, para este projeto as coordenadas de cada arranjo, e θ , para este caso, são os ângulos $\hat{\theta}_1$ e $\hat{\theta}_2$ estimados.

Então, para a primeira reta, temos a seguinte equação:

$$y_1 = \tan(\hat{\theta}_1)x_1 - \tan(\hat{\theta}_1)x_{01} + y_{01}, \quad (2.14)$$

onde (x_{01}, y_{01}) são as coordenadas do primeiro arranjo de antenas e $\hat{\theta}_1$ é a direção de chegada estimada para o primeiro arranjo de antenas.

Para a segunda reta, temos a seguinte equação:

$$y_2 = \tan(\hat{\theta}_2)x_2 - \tan(\hat{\theta}_2)x_{02} + y_{02}. \quad (2.15)$$

onde (x_{02}, y_{02}) são as coordenadas do segundo arranjo de antenas e $\hat{\theta}_2$ é a direção de chegada estimada para o segundo arranjo de antenas.

A interseção de duas retas define um ponto onde as coordenadas da primeira reta são iguais às coordenadas da segunda reta, ou seja, $x_1 = x_2$ e $y_1 = y_2$. Utilizando como referência o valor de y , obtém-se a seguinte equação:

$$\tan(\hat{\theta}_1)x_1 - \tan(\hat{\theta}_1)x_{01} + y_{01} = \tan(\hat{\theta}_2)x_2 - \tan(\hat{\theta}_2)x_{02} + y_{02}, \quad (2.16)$$

como $x_1 = x_2$, considera-se apenas como x na equação e isola-se essa variável. Assim, obtém-se a equação que define a coordenada \hat{x} estimada da seguinte maneira:

$$\hat{x} = \frac{\tan(\hat{\theta}_1)x_{01} - \tan(\hat{\theta}_2)x_{02} - y_{01} + y_{02}}{\tan(\hat{\theta}_1) - \tan(\hat{\theta}_2)}. \quad (2.17)$$

Sabe-se que $y_1 = y_2$ (considera apenas como y), com isso, pode-se substituir a equação da coordenada estimada \hat{x} tanto na Equação 2.14 como na Equação 2.15. Então, substituindo a variável x_1 na Equação 2.14 pela Equação 2.17 da coordenada \hat{x} , obtém-se a coordenada \hat{y} estimada da seguinte maneira:

$$\hat{y} = \tan(\hat{\theta}_1) \frac{\tan(\hat{\theta}_1)x_{01} - \tan(\hat{\theta}_2)x_{02} - y_{01} + y_{02}}{\tan(\hat{\theta}_1) - \tan(\hat{\theta}_2)} - \tan(\hat{\theta}_1)x_{01} + y_{01}. \quad (2.18)$$

Dessa maneira, a partir das Equações 2.17 e 2.18 obtém-se as coordenadas estimadas do ponto que representa a posição do emissor do sinal.

2.3.2 Estimação da Posição para Quatro Arranjos de Antenas

Nesta Seção é apresentado o método para a estimação da posição do emissor utilizando quatro arranjos com quatro antenas idênticas cada. A posição é estimada por meio da utilização da direção de chegada $\hat{\theta}$, estimada para cada arranjo de antenas, obtida a partir do modelo descrito na Subseção 2.2.3, em conjunto com a técnica de triangulação apresentada em [9].

Com isso, considera-se que os arranjos de antenas estão dispostos formando um quadrado onde cada arranjo é um vértice deste quadrilátero, com coordenadas $(x, y) \in \mathbb{R}^2$, e cada aresta é representada pela distância entre os arranjos - observa-se que por ser um quadrado, as distâncias entre os vértices são iguais. Então, obtém-se um sistema quadri-

lâtero baseado em arranjos de antenas e o emissor do sinal se encontra posicionado neste quadrilátero, como descrito em [9].

A Figura 2.4 representa de forma gráfica o quadrilátero onde se encontra o emissor, além de mostrar a definição da posição do transmissor do sinal a partir da área formada pela triangulação das direções de chegada estimadas em cada arranjo de antenas. Os pontos $P_{1,2}$, $P_{2,4}$, $P_{3,1}$ e $P_{4,3}$ são os pontos de interseção entre as direções de chegada estimadas entre dois arranjos de antenas, onde seus índices representam os arranjos de referência. Já $d_{1,2}$, $d_{2,4}$, $d_{3,1}$ e $d_{4,3}$ são as distâncias entre os pontos que representam as coordenadas onde se posicionam os arranjos de antenas e os pontos que correspondem às posições estimadas do emissor, seus índices representam os arranjos de referência. A distância entre cada arranjo é representada por Δ . Vale observar que esses pares de arranjos de antenas se mantêm durante o projeto.

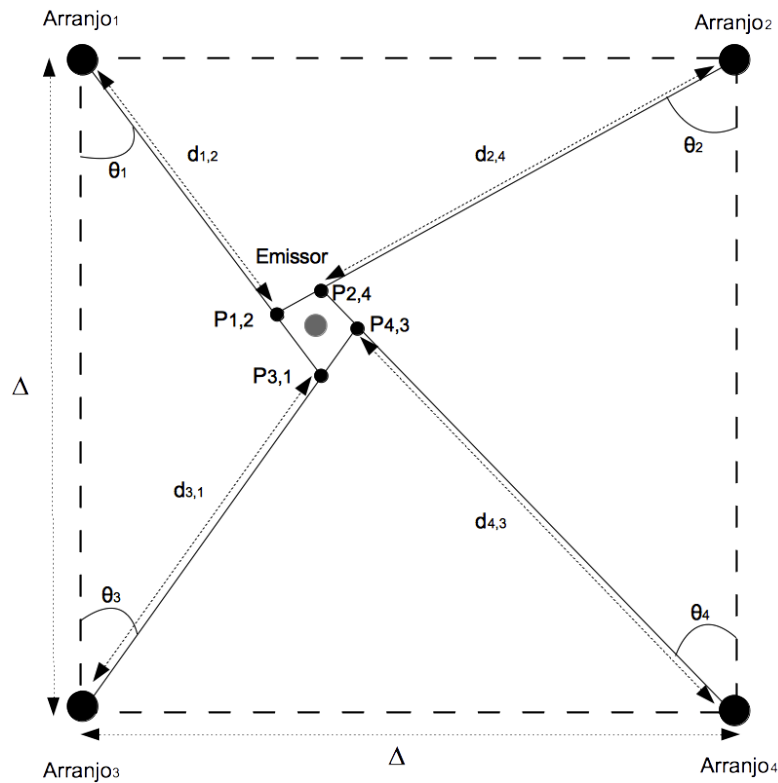


Figura 2.4: Representação gráfica da triangulação para estimação da posição do emissor do sinal.

Primeiro, determinam-se as estimações da direção de chegada do emissor, $\hat{\theta}_1$, $\hat{\theta}_2$, $\hat{\theta}_3$ e $\hat{\theta}_4$, para os quatro arranjos por meio da técnica descrita em [7]. Depois, são definidas as equações que representam as distâncias $d_{1,2}$, $d_{2,4}$, $d_{3,1}$ e $d_{4,3}$ descritas na Figura 2.4, por meio

da lei dos senos, da seguinte forma:

$$d_{r,s} = \begin{cases} \frac{\Delta \cos(\hat{\theta}_s)}{\text{sen}(\hat{\theta}_r + \hat{\theta}_s)}, & \text{para } (r, s) \in [(1, 2), (4, 3)] \\ \frac{\Delta \text{sen}(\hat{\theta}_s)}{\text{sen}(\hat{\theta}_r + \hat{\theta}_s)}, & \text{para } (r, s) \in [(2, 4), (3, 1)], \end{cases} \quad (2.19)$$

onde r, s representam os arranjos tomados em pares e Δ representa a distância entre os arranjos de antenas.

Depois, considera-se que as coordenadas cartesianas das posições onde os quatro arranjos de antenas estão dispostos são $(0, \Delta)$, (Δ, Δ) , $(0, 0)$ e $(\Delta, 0)$, respectivamente, e então, a partir das distâncias calculadas por meio da Equação 2.19, obtém-se as seguintes expressões para as coordenadas dos pontos $P_{1,2}$, $P_{2,4}$, $P_{3,1}$ e $P_{4,3}$, na forma de $(\hat{x}_{r,s}, \hat{y}_{r,s})$:

$$\hat{x}_{r,s} = \begin{cases} d_{r,s} \text{sen}(\hat{\theta}_r), & \text{para } (r, s) \in [(1, 2), (3, 1)] \\ \Delta - d_{r,s} \text{sen}(\hat{\theta}_r), & \text{para } (r, s) \in [(2, 4), (4, 3)], \end{cases} \quad (2.20)$$

$$\hat{y}_{r,s} = \begin{cases} d_{r,s} \cos(\hat{\theta}_r), & \text{para } (r, s) \in [(3, 1), (4, 3)] \\ \Delta - d_{r,s} \cos(\hat{\theta}_r), & \text{para } (r, s) \in [(1, 2), (2, 4)]. \end{cases} \quad (2.21)$$

Por fim, a coordenada (\hat{x}, \hat{y}) que representa o ponto que corresponde à posição estimada do emissor é definida pela média aritmética das coordenadas dos pontos $P_{1,2}$, $P_{2,4}$, $P_{3,1}$ e $P_{4,3}$ estimadas pelas Equações 2.20 e 2.21.

Capítulo 3

Simulações e Análise dos Resultados

3.1 Introdução

Neste capítulo são descritas as simulações realizadas no software MATLAB[®] que atestam a aplicabilidade dos modelos de estimação da direção de chegada e posição do emissor abordados neste trabalho e apresenta as análises realizadas. Este capítulo está dividido em três Seções, onde, na Seção 3.2, são apresentadas as simulações da aplicação da técnica de estimação da direção de chegada para dois arranjos de antenas e para quatro arranjos de antenas. Na Seção 3.3, são apresentadas as simulações da aplicação da técnica de estimação da posição do emissor do sinal para dois arranjos de antenas e para quatro arranjos de antenas.

3.2 Simulação da Estimação da Direção de Chegada

Para as simulações realizadas neste trabalho, o espaçamento angular ϕ escolhido foi de 40° , entre as antenas, a partir do que foi apresentado em [7], o ruído \mathbf{n} presente na Equação 2.2 foi desconsiderado e foi variada apenas a posição θ do emissor do sinal. Aplica-se a técnica proposta em [7] para cada arranjo de antenas, ou seja, obtém-se os vetores $p(\theta)$ e $g(\theta)$ que são comparados com base na Equação 2.11 para obtenção da estimação da direção de chegada. Para auferir o desempenho do modelo aplicado são plotados, para cada arranjo de antena, gráficos de erro que comparam os resultados obtidos pelo modelo aplicado e pelos modelos estado da arte.

O padrão de ganho de diretividade utilizado neste trabalho foi o da antena direcional Yagi-Uda e pode ser visualizado na Figura 3.1 para cada antena do arranjo. Como as quatro antenas que compõem o arranjo são iguais, os seus padrões de ganho de diretividade também serão, estando apenas deslocados de acordo com o espaçamento angular - para este projeto as antenas estão rotacionadas nas direções -60° , -20° , 20° e 60° .

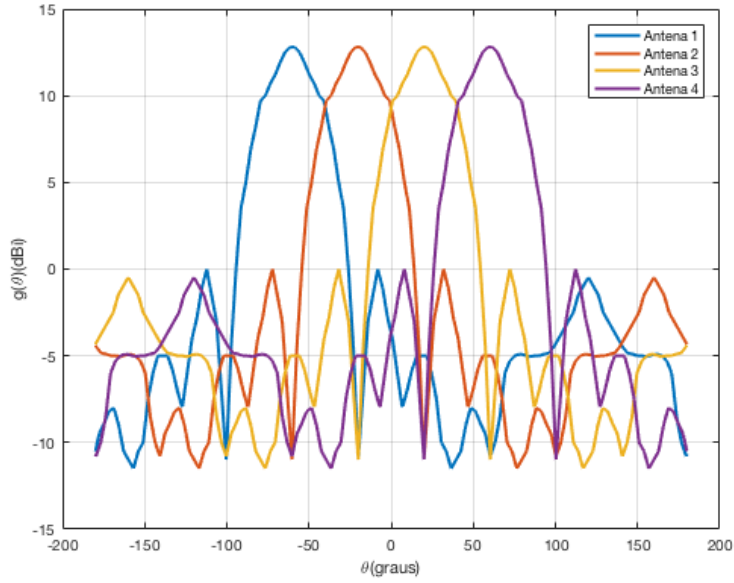


Figura 3.1: Padrão de ganho de diretividade das antenas simuladas.

Aplica-se a técnica proposta em [7] para cada arranjo de antenas e assim obtém-se o vetor $P(\theta)$ das diferenças entre o padrão de ganho de diretividade da antena e da potência do sinal recebido em cada arranjo, como descrito na Equação 2.11 que representa a potência espacial de resposta. Para efeitos de demonstração, a Figura 3.2a mostra as potências espaciais de resposta para uma direção de chegada $\theta_1 = 21.75^\circ$ e $\theta_2 = 41.47^\circ$ em relação aos arranjos de antenas 1 e 2, para o caso da utilização de dois arranjos. A Figura 3.2b mostra as potências espaciais de resposta para uma direção de chegada $\theta_1 = -74.55^\circ$, $\theta_2 = 51.21^\circ$, $\theta_3 = 43.13^\circ$ e $\theta_4 = -17.84^\circ$ em relação aos arranjos de antenas 1, 2, 3 e 4, para o caso da utilização de quatro arranjos, como apresentado na Figura 2.4 - geradas de forma aleatória.

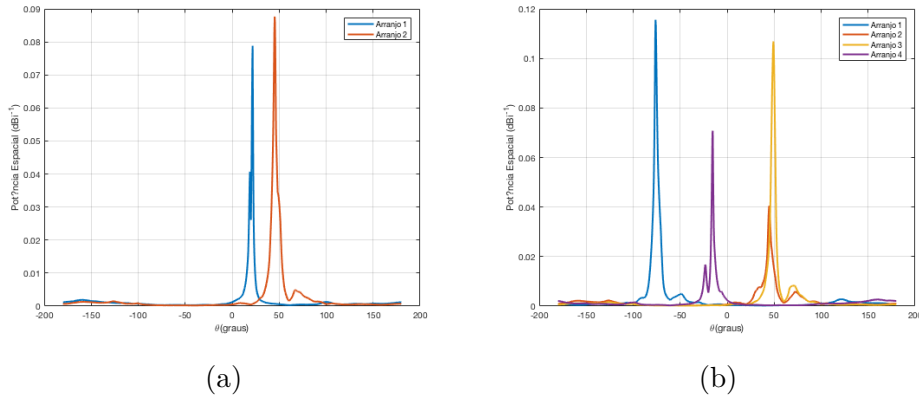


Figura 3.2: (a) Resposta de potência espacial para cada arranjo de antenas para dois arranjos e (b) Resposta de potência espacial para cada arranjo de antenas para quatro arranjos.

Por fim, para fins de análise é utilizada a raiz do erro médio quadrático (RMSE: *Root Mean Square Error*) para avaliar o desempenho do modelo de estimação da direção de chegada aplicado neste projeto em comparação com os modelos estado da arte em cada arranjo de antenas. A raiz do RMSE é calculada a partir da seguinte expressão:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (\theta - \hat{\theta})^2}{N}}. \quad (3.1)$$

Cabe destacar que os resultados foram obtidos por meio do método de simulações de Monte Carlo, onde os valores de coordenadas reais do emissor foram obtidas de forma aleatória para cada simulação e o resultado final do RMSE foi obtido por meio da média dos valores resultantes das simulações de Monte Carlo. Também foram utilizadas diferentes janelas de amostras sobre as quais foram realizadas as simulações de Monte Carlo, iniciando com 1 amostra e encerrando com 40 amostras.

3.2.1 Análise dos Resultados para Dois Arranjos de Antenas

Foram realizados testes com direções de chegada do emissor geradas de forma aleatória e dentro de uma variedade de áreas de possíveis coordenadas cartesianas, com valores de x e $y \in \mathbb{Q}$, a fim de observar para quais valores de direção de chegada o modelo apresenta um resultado satisfatório. Para este projeto, foi escolhida uma distância de $\Delta = 30$ metros entre os arranjos de antenas e a distância entre a fonte do sinal e os arranjos de antenas varia de 20 a 100 metros, com o intuito de atestar o desempenho dos modelos para diferentes distâncias entre a fonte do sinal e os arranjos de antenas receptoras.

Primeiro, foi gerado o gráfico de RMSE para o modelo proposto e para os modelos estado da arte apresentado na Figura 3.3a para o arranjo de antenas 1. Foi gerado,

também, o gráfico de RMSE para o modelo proposto e para os modelos estado da arte apresentado na Figura 3.3b para o arranjo de antenas 2. Esses gráficos foram gerados a partir do intervalo de coordenadas $x = [25, \dots, 26]$ e $y = [20, \dots, 21]$.

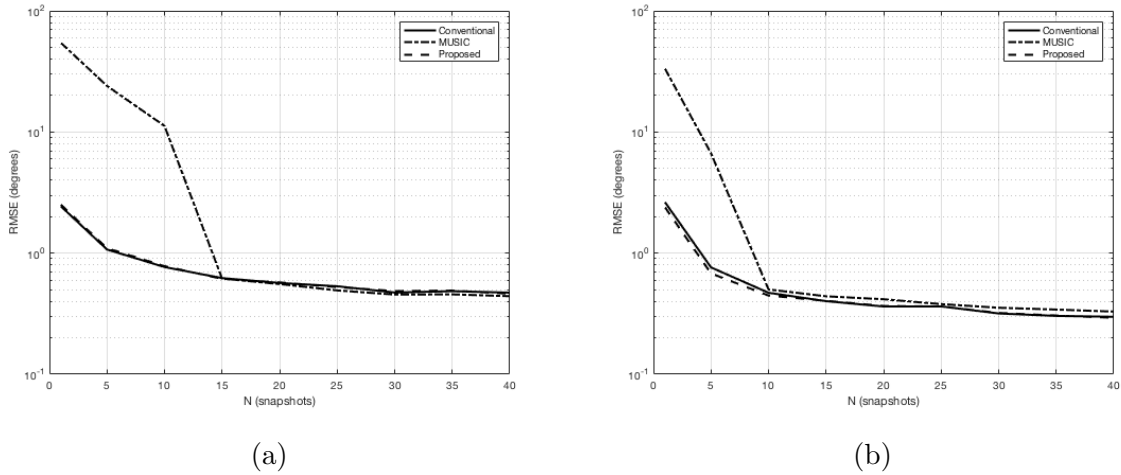


Figura 3.3: (a) RMSE das estimações da direção de chegada do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas 1 e (b) para o arranjo de antenas 2.

Tabela 3.1: Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo e arranjo de antenas referente para o intervalo $x = [25, \dots, 26]$ e $y = [20, \dots, 21]$.

Técnica	RMSE(graos)
Proposta - arranjo 1	[2.5084 1.0977 0.7806 0.6129 0.5729 0.5247 0.4859 0.4905 0.4622]
Proposta - arranjo 2	[2.3914 0.6802 0.4463 0.4039 0.3661 0.3626 0.3207 0.3055 0.2924]
Convencional - arranjo 1	[2.4338 1.0714 0.7675 0.6220 0.5671 0.5328 0.4729 0.4851 0.4716]
Convencional - arranjo 2	[2.6346 0.7627 0.4706 0.4013 0.3626 0.3632 0.3175 0.3032 0.2981]
MUSIC - arranjo 1	[54.3985 24.0136 11.2147 0.6169 0.5555 0.4923 0.4546 0.4565 0.4409]
MUSIC - arranjo 2	[33.3904 6.6784 0.5014 0.4400 0.4161 0.3794 0.3540 0.3420 0.3290]

Observa-se, a partir da Figura 3.3 e da Tabela 3.1, que, para o intervalo $x = [25, \dots, 26]$ e $y = [20, \dots, 21]$, os modelos proposto e convencional apresentaram resultados adequados, com valores baixos de erro, menores de que 3° . Já o modelo que aplica o algoritmo MUSIC obteve um resultado ruim, em comparação aos outros modelos, para os casos de 1 e 5 amostras, para o arranjo 1, onde apresentou um erro de 54.3985° e 24.0136° , respectivamente, e para o caso de 1 amostra, para o arranjo 2, onde apresentou um erro de 33.3904° .

Depois, foi gerado o gráfico de RMSE para o modelo proposto e para os modelos estado da arte apresentado na Figura 3.4a para o arranjo de antenas 1. Foi gerado, também, o

gráfico apresentado na Figura 3.4b para o arranjo de antenas 2. Ambos os gráficos foram gerados a partir do intervalo de coordenadas $x = [15, \dots, 30]$ e $y = [20, \dots, 40]$.

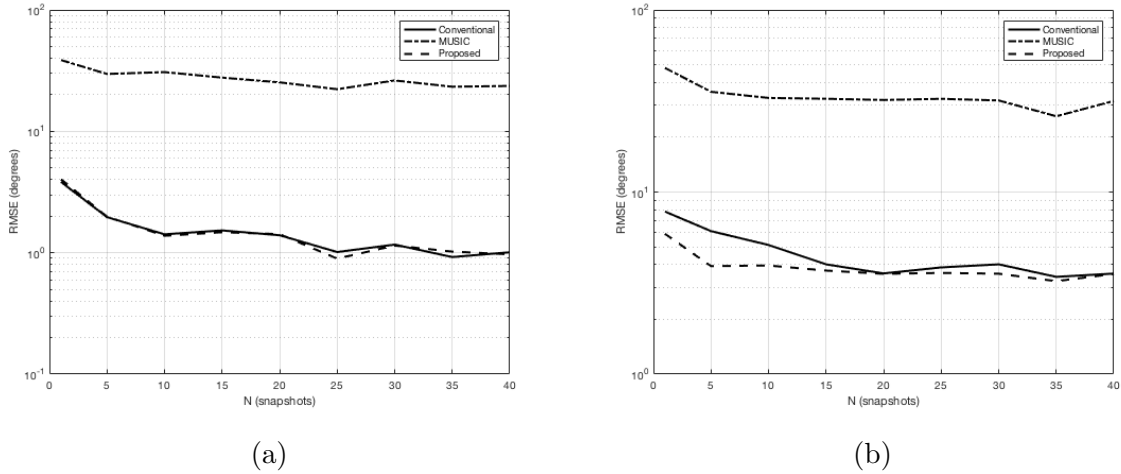


Figura 3.4: (a) RMSE das estimações da direção de chegada do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas 1 e (b) para o arranjo de antenas 2.

Tabela 3.2: Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo e arranjo de antenas referente para o intervalo $x = [15, \dots, 30]$ e $y = [20, \dots, 40]$.

Técnica	RMSE(graus)
Proposta - arranjo 1	[4.0333 1.9829 1.3794 1.4755 1.4228 0.8945 1.1455 1.0222 0.9700]
Proposta - arranjo 2	[5.8965 3.9192 3.9498 3.7042 3.5556 3.5956 3.5614 3.2394 3.5525]
Convencional - arranjo 1	[3.8333 1.9645 1.4180 1.5271 1.3936 1.0134 1.1669 0.9214 1.0090]
Convencional - arranjo 2	[7.8109 6.1016 5.1204 4.0079 3.5736 3.8553 4.0081 3.4221 3.5668]
MUSIC - arranjo 1	[38.6453 29.6836 30.7442 27.6891 25.3056 22.2239 26.2433 23.2981 23.6517]
MUSIC - arranjo 2	[48.0437 35.5193 32.8623 32.5155 32.0201 32.5018 31.8343 26.0657 31.6172]

A partir da Figura 3.4 e da Tabela 3.2, constata-se que com o aumento da distância entre a fonte do sinal e os arranjos de antenas receptoras os resultados obtidos pelos três modelos apresentam uma redução de desempenho para o intervalo de coordenadas $x = [15, \dots, 30]$ e $y = [20, \dots, 40]$. Contudo, os modelos proposto e convencional ainda apresentam um resultado com erro abaixo de 10° , enquanto o modelo que aplica o algoritmo MUSIC obteve um resultado pior que os outros modelos para todos os casos de amostras, tanto para o arranjo 1, quanto para o arranjo 2, onde o menor valor de erro apurado foi de 22.2239° .

Em seguida, foi gerado o gráfico de RMSE para o modelo proposto e para os modelos estado da arte apresentado na Figura 3.5a para o arranjo de antenas 1. Também foi

gerado o gráfico apresentado na Figura 3.5b para o arranjo de antenas 2. Esses gráficos foram gerados a partir do intervalo de coordenadas $x = [-15, \dots, 45]$ e $y = [20, \dots, 60]$.

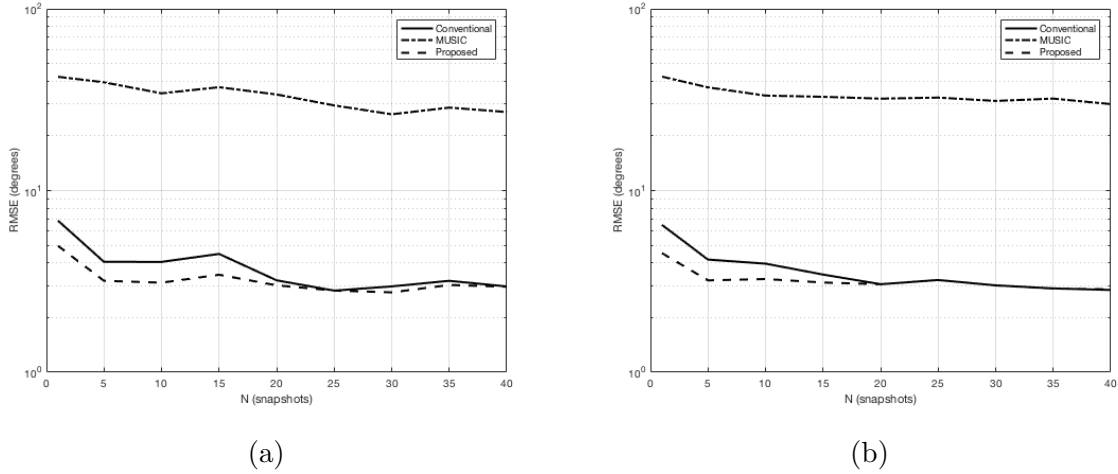


Figura 3.5: (a) RMSE das estimações da direção de chegada do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas 1 e (b) para o arranjo de antenas 2.

Tabela 3.3: Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo e arranjo de antenas referente para o intervalo $x = [-15, \dots, 45]$ e $y = [20, \dots, 60]$.

Técnica	RMSE(graus)
Proposta - arranjo 1	[4.9627 3.1879 3.1123 3.4398 3.0086 2.8156 2.7518 3.0213 2.9565]
Proposta - arranjo 2	[4.5255 3.2039 3.2585 3.1176 3.0506 3.2206 3.0050 2.8885 2.8620]
Convencional - arranjo 1	[6.8345 4.0515 4.0496 4.4797 3.2059 2.8138 2.9682 3.1866 2.9657]
Convencional - arranjo 2	[6.4754 4.1693 3.9604 3.4492 3.0518 3.2183 3.0078 2.8940 2.8375]
MUSIC - arranjo 1	[42.2746 39.4218 34.2897 37.0512 33.7802 29.4148 26.2797 28.6137 27.0374]
MUSIC - arranjo 2	[42.3603 36.9653 33.3083 32.8020 32.0395 32.4791 31.1255 32.0686 29.9043]

Observa-se, a partir da Figura 3.5 e da Tabela 3.3, que os modelos proposto e convencional apresentaram para o intervalo de coordenadas $x = [-15, \dots, 45]$ e $y = [20, \dots, 60]$ um desempenho parecido com o auferido para o intervalo de coordenadas $x = [15, \dots, 30]$ e $y = [20, \dots, 40]$, onde o valor apurado de erro não passou de 10° , porém, para os casos onde há 5 ou mais amostras, o resultado foi pior em relação ao intervalo anterior. Para o modelo que aplica o algoritmo MUSIC, vale o mesmo, os resultados foram parecidos com os atingidos pelo intervalo anterior, porém, houve uma piora no desempenho para os casos com 5 ou mais amostras, onde o menor erro calculado foi de 27.0374° .

Por fim, foi gerado o gráfico de RMSE para o modelo proposto e para os modelos estado da arte apresentado na Figura 3.6a para o arranjo de antenas 1. Foi gerado, também, o gráfico apresentado na Figura 3.6b para o arranjo de antenas 2. O intervalo de

coordenadas utilizado para gerar esses gráficos foi $x = [-30, \dots, 60]$ e $y = [20, \dots, 100]$. Esse intervalo foi utilizado com o intuito de apurar a eficiência dos modelos de estimação da direção de chegada para longas distâncias entre a fonte do sinal e os arranjos de antenas receptoras.

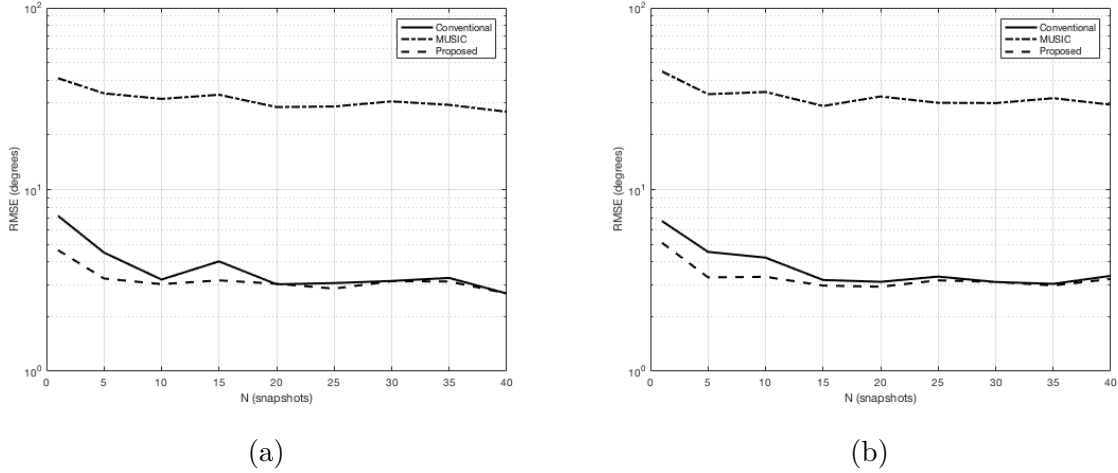


Figura 3.6: (a) RMSE das estimações da direção de chegada do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas 1 e (b) para o arranjo de antenas 2.

Tabela 3.4: Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo e arranjo de antenas referente para o intervalo $x = [-30, \dots, 60]$ e $y = [20, \dots, 100]$.

Técnica	RMSE(graus)
Proposta - arranjo 1	[4.6427 3.2398 3.0165 3.1634 3.0316 2.8504 3.1307 3.1171 2.6829]
Proposta - arranjo 2	[5.0943 3.2878 3.3087 2.9622 2.9187 3.1658 3.1012 2.9670 3.2191]
Convencional - arranjo 1	[7.1747 4.4993 3.1966 4.0236 3.0096 3.0573 3.1399 3.2622 2.6767]
Convencional - arranjo 2	[6.7145 4.5384 4.2200 3.1795 3.1065 3.3188 3.0993 3.0274 3.3497]
MUSIC - arranjo 1	[41.0012 33.8372 31.5492 33.2281 28.44095 28.6553 30.5652 29.2336 26.7909]
MUSIC - arranjo 2	[44.6865 33.4867 34.4273 28.8333 32.5221 30.0257 29.9194 31.8284 29.3124]

A analisar a Figura 3.6 e a Tabela 3.4, constata-se que os resultados obtidos pelos três modelos, para o intervalo $x = [-30, \dots, 60]$ e $y = [20, \dots, 100]$, apresentam uma redução de desempenho, porém próximo dos valores obtidos pelo intervalo anterior, $x = [-15, \dots, 45]$ e $y = [20, \dots, 60]$. Os modelos proposto e convencional ainda apresentam um resultado com valores de erro abaixo de 10° e o modelo que aplica o algoritmo MUSIC obteve um resultado similar ao obtido pelo intervalo anterior para todos os casos de amostras, tanto para o arranjo 1, quanto para o arranjo 2, onde o menor valor de erro apurado foi 26.7909° .

Assim, conclui-se que a técnica de estimação da direção de chegada aplicada neste projeto, para o caso de dois arranjos de antenas diferentes, apresenta um desempenho satisfatório para distâncias curtas e longas, mantendo o valor de erro quadrático abaixo dos 10° para todos os intervalos de coordenadas utilizados, assim como a técnica convencional.

Entretanto, a técnica que aplica o algoritmo MUSIC apresentou um resultado adequado apenas para o primeiro intervalo, $x = [25, \dots, 26]$ e $y = [20, \dots, 21]$, com valores de coordenada muito específicos, e para um número de amostras maior que 1. Essa técnica se mostrou muito sensível aos erros, apresentando um desempenho aquém para um sistema de baixo custo no qual não há calibração e nem a utilização de *hardware* complexo, quando comparada com a técnica aplicada baseada nas diferenças de potência do sinal recebido. Assim, necessita-se de maior investigação para que seja possível aprimorar esta técnica para este tipo de cenário e obter maior acurácia na estimação da direção de chegada.

3.2.2 Análise dos Resultado para Quatro Arranjos de Antenas

Para atestar a validação da técnica de estimação da direção de chegada para quatro arranjos de antenas as coordenadas do emissor do sinal foram geradas de forma aleatória e dentro de uma variedade de áreas de possíveis coordenadas cartesianas, com valores de x e $y \in \mathbb{Q}$. Como descrito na Subseção 2.3.2, os arranjos de antenas estão dispostos em um formato quadrático e, para este trabalho, a distância entre os arranjos é de $\Delta = 40$ metros. Os diferentes intervalos são utilizados com o intuito de auferir o desempenho das técnicas para distâncias entre o emissor do sinal e os arranjos de antenas receptoras mais próximas e mais afastadas.

Primeiro, foram gerados os gráficos apresentados nas Figuras 3.7a, 3.7b, 3.7c e 3.7d que caracterizam os valores de RMSE para o modelo proposto e para os modelos estado da arte em relação aos arranjos de antenas 1, 2, 3 e 4, respectivamente. O intervalo de coordenadas utilizado para gerar os gráficos foi $x = [25, \dots, 26]$ e $y = [20, \dots, 21]$.

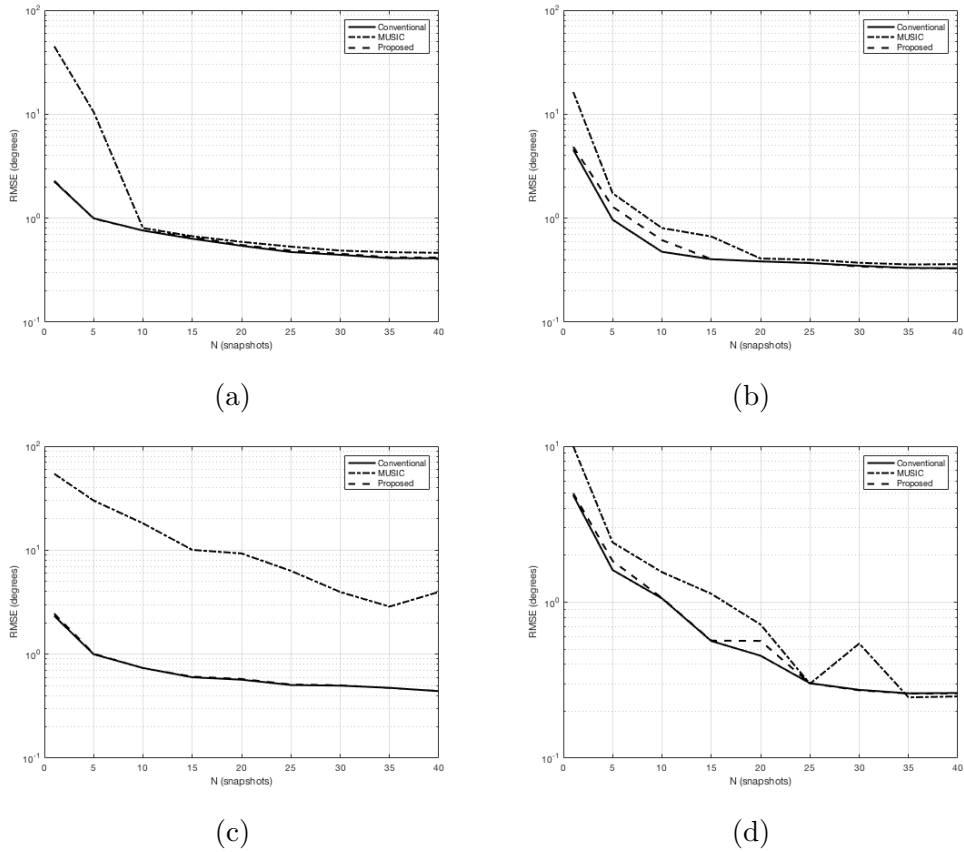


Figura 3.7: (a) RMSE das estimações da direção de chegada do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas 1, (b) para o arranjo de antenas 2, (c) para o arranjo de antenas 3 e (d) para o arranjo de antenas 4.

Tabela 3.5: Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo e arranjo de antenas referente para o intervalo $x = [25, \dots, 26]$ e $y = [20, \dots, 21]$.

Técnica	RMSE(graus)
Proposta - arranjo 1	[2.2888 0.9904 0.7606 0.6549 0.5521 0.4877 0.4549 0.4204 0.4182]
Proposta - arranjo 2	[4.8713 1.2870 0.6149 0.4041 0.3836 0.3720 0.3429 0.3319 0.3275]
Proposta - arranjo 3	[2.4538 1.0114 0.7342 0.6080 0.5776 0.5110 0.5020 0.4727 0.4427]
Proposta - arranjo 4	[4.9959 1.8386 1.0651 0.5671 0.5648 0.3018 0.2722 0.2595 0.2599]
Convencional - arranjo 1	[2.2536 0.9968 0.7603 0.6341 0.5422 0.4721 0.4439 0.4129 0.4108]
Convencional - arranjo 2	[4.5545 0.9661 0.4747 0.4030 0.3842 0.3699 0.3488 0.3323 0.3303]
Convencional - arranjo 3	[2.3352 0.9976 0.7367 0.5995 0.5682 0.5053 0.4983 0.4747 0.4407]
Convencional - arranjo 4	[4.8511 1.6080 1.0575 0.5639 0.4539 0.3024 0.2742 0.2605 0.2617]
MUSIC - arranjo 1	[45.0557 10.5012 0.8033 0.6712 0.5920 0.5323 0.4879 0.4705 0.4643]
MUSIC - arranjo 2	[16.4043 1.7332 0.8034 0.6669 0.4094 0.3990 0.3728 0.3588 0.3613]
MUSIC - arranjo 3	[54.2854 30.0031 18.1173 10.0655 9.2982 6.3305 3.9620 2.8678 3.9655]
MUSIC - arranjo 4	[10.0128 2.4173 1.5592 1.1323 0.7190 0.2998 0.5434 0.2454 0.2489]

A partir da Figura 3.7 e da Tabela 3.5, constata-se que os modelos proposto e convencional apresentaram, para o intervalo de coordenadas $x = [25, \dots, 26]$ e $y = [20, \dots, 21]$, um desempenho adequado, onde o valor do erro não passou de 5° para nenhum dos arranjos de antenas. Já a técnica que aplica o algoritmo MUSIC apresentou um desempenho adequado para os arranjos de antenas, com exceção das simulações realizadas com 1 amostra para o arranjo 1, onde o erro chegou a 45.0557° , e das simulações realizadas com 1 e 5 amostra para o arranjo 3, onde o erro apurado foi de 54.2854° e 30.0031° , respectivamente.

Em seguida, foram gerados os gráficos apresentados nas Figuras 3.8a, 3.8b, 3.8c e 3.8d que caracterizam os valores de RMSE para o modelo proposto e para os modelos estado da arte em relação aos arranjos de antenas 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Os gráficos foram gerados a partir do intervalo de coordenadas $x = [15, \dots, 25]$ e $y = [15, \dots, 25]$.

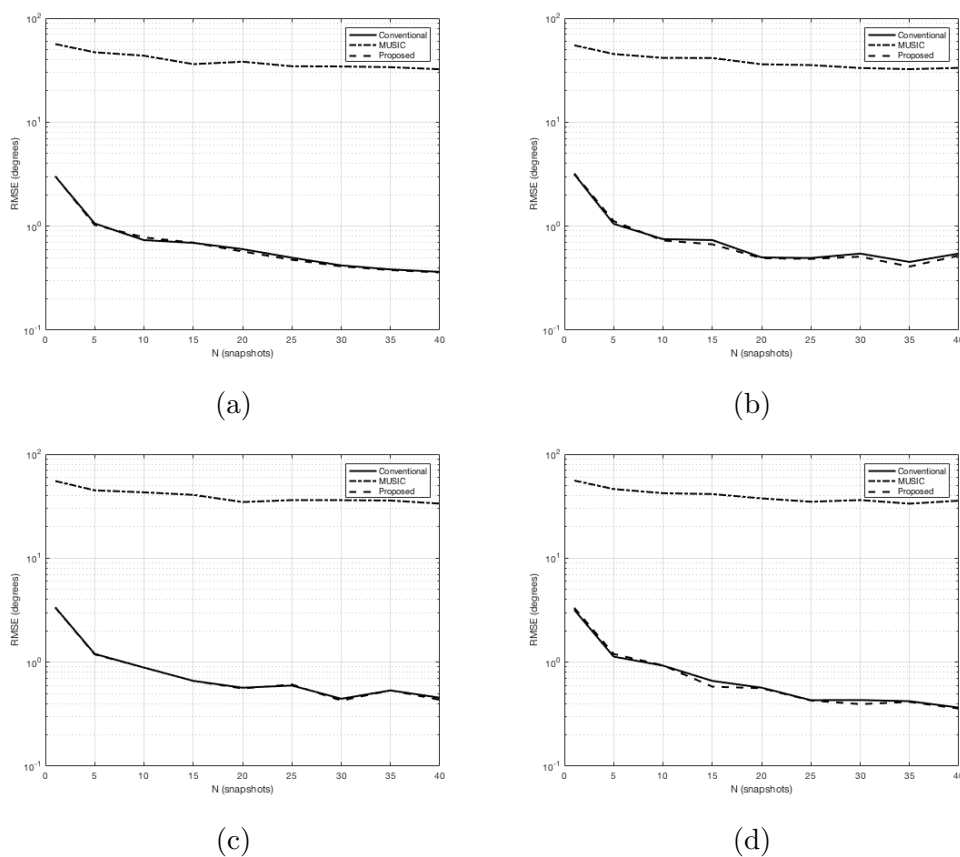


Figura 3.8: (a) RMSE das estimações da direção de chegada do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas 1, (b) para o arranjo de antenas 2, (c) para o arranjo de antenas 3 e (d) para o arranjo de antenas 4.

Tabela 3.6: Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo e arranjo de antenas referente para o intervalo $x = [15, \dots, 25]$ e $y = [15, \dots, 25]$.

Técnica	RMSE(grauss)
Proposta - arranjo 1	[3.0247 1.0276 0.7797 0.6949 0.5701 0.4756 0.4107 0.3780 0.3591]
Proposta - arranjo 2	[3.2117 1.1188 0.7282 0.6697 0.4921 0.4849 0.5087 0.4093 0.5207]
Proposta - arranjo 3	[3.3565 1.1878 0.8880 0.6607 0.5583 0.6100 0.4279 0.5356 0.4341]
Proposta - arranjo 4	[3.3376 1.1994 0.9321 0.5816 0.5613 0.4278 0.3948 0.4148 0.3575]
Convencional - arranjo 1	[3.0168 1.0618 0.7342 0.6904 0.6013 0.4975 0.4194 0.3839 0.3637]
Convencional - arranjo 2	[3.1678 1.0531 0.7508 0.7350 0.5009 0.4940 0.5446 0.4531 0.5448]
Convencional - arranjo 3	[3.3728 1.2016 0.8871 0.6612 0.5680 0.5962 0.4451 0.5348 0.4552]
Convencional - arranjo 4	[3.1936 1.1304 0.9267 0.6605 0.5686 0.4309 0.4321 0.4213 0.3658]
MUSIC - arranjo 1	[56.4162 47.0022 43.6070 36.1598 38.1476 34.4962 34.3457 33.7911 32.2981]
MUSIC - arranjo 2	[54.9096 45.2342 41.5176 41.4481 36.0373 35.4149 33.1876 32.3641 33.2771]
MUSIC - arranjo 3	[55.1855 44.9436 42.9631 40.6272 34.6698 36.1657 36.1437 35.8504 33.4890]
MUSIC - arranjo 4	[55.8012 46.2109 42.1639 41.3590 37.5831 34.9060 36.2238 33.4430 35.7143]

Ao analisar a Figura 3.8 e a Tabela 3.6, constata-se que os modelos proposto e convencional apresentaram, para o intervalo de coordenadas $x = [15, \dots, 25]$ e $y = [15, \dots, 25]$, um desempenho adequado, similar ao auferido para o intervalo de coordenadas anterior, uma vez que os valores de erro não superaram 5° para nenhum dos arranjos de antenas. Contudo, a técnica que aplica o algoritmo MUSIC apresentou um desempenho inferior para todos os arranjos de antenas quando comparado ao intervalo anterior, onde o erro apurado foi superior a 30° em todas as simulações para todos os valores de amostras, chegando a 56.4162° nas simulações realizadas com 1 amostra para o arranjo 1.

Por fim, foram gerados os gráficos apresentados nas Figuras 3.9a, 3.9b, 3.9c e 3.9d que caracterizam os valores de RMSE para o modelo proposto e para os modelos estado da arte em relação aos arranjos de antenas 1, 2, 3 e 4, respectivamente. O intervalo de coordenadas utilizado para gerar os gráficos foi $x = [5, \dots, 35]$ e $y = [5, \dots, 35]$, para que fosse possível auferir o desempenho das técnicas para curtas distâncias entre a fonte do sinal e os arranjos de antenas.

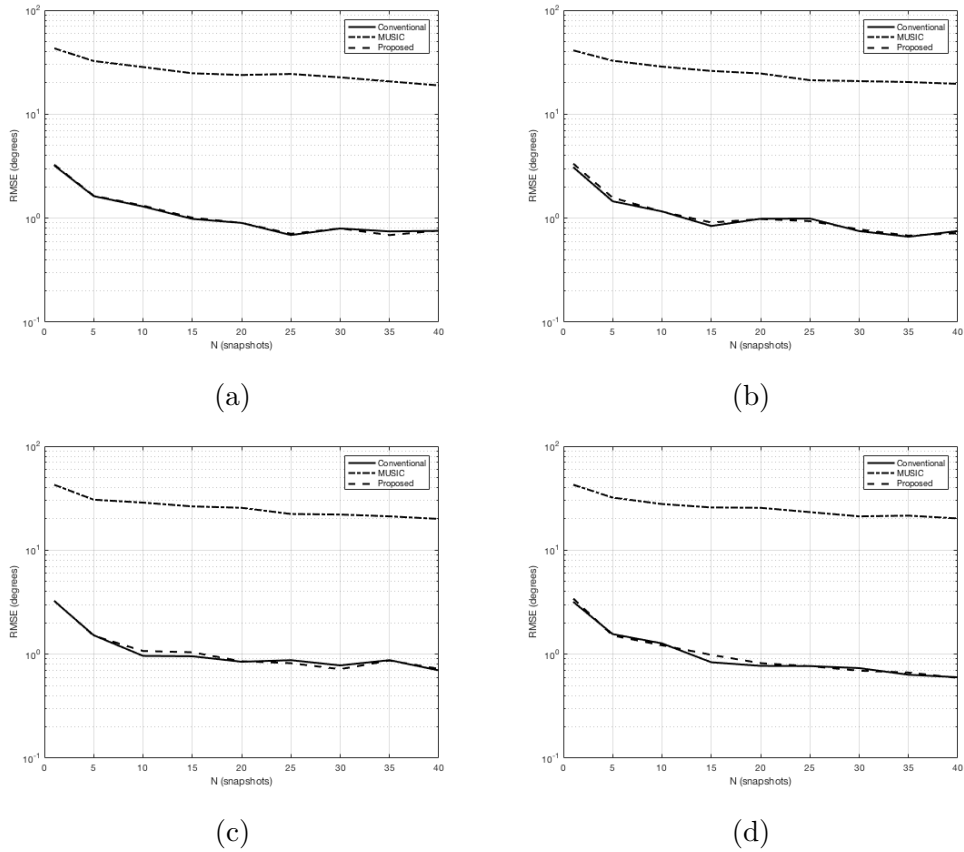


Figura 3.9: (a) RMSE das estimações da direção de chegada do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas 1, (b) para o arranjo de antenas 2, (c) para o arranjo de antenas 3 e (d) para o arranjo de antenas 4.

Tabela 3.7: Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo e arranjo de antenas referente para o intervalo $x = [5, \dots, 35]$ e $y = [5, \dots, 35]$.

Técnica	RMSE(graus)
Proposta - arranjo 1	[3.2746 1.6464 1.3183 1.0110 0.9001 0.7077 0.7975 0.6870 0.7600]
Proposta - arranjo 2	[3.3456 1.5731 1.1574 0.9084 0.9801 0.9369 0.7780 0.6788 0.7168]
Proposta - arranjo 3	[3.2606 1.5059 1.0730 1.0424 0.8545 0.8193 0.7173 0.8675 0.7232]
Proposta - arranjo 4	[3.4329 1.5094 1.2173 0.9852 0.8192 0.7665 0.6933 0.6659 0.5909]
Convencional - arranjo 1	[3.2162 1.6297 1.2954 0.9840 0.9001 0.6883 0.7962 0.7462 0.7550]
Convencional - arranjo 2	[3.0958 1.4537 1.1613 0.8408 0.9870 0.9917 0.7510 0.6631 0.7520]
Convencional - arranjo 3	[3.2477 1.5213 0.9630 0.9549 0.8450 0.8754 0.7798 0.8761 0.6982]
Convencional - arranjo 4	[3.1883 1.5599 1.2697 0.8358 0.7718 0.7684 0.7345 0.6343 0.5999]
MUSIC - arranjo 1	[43.0122 32.4518 28.3961 24.7424 23.8057 24.3661 22.6066 20.6661 18.9102]
MUSIC - arranjo 2	[41.0866 32.6889 28.6437 26.0571 24.6297 21.2233 20.8038 20.3805 19.5666]
MUSIC - arranjo 3	[42.5727 30.5812 28.6811 26.3721 25.5597 22.2900 22.0192 21.1659 19.9775]
MUSIC - arranjo 4	[42.5887 32.0473 27.7712 25.7686 25.5505 23.2215 21.1524 21.4915 20.1964]

Observa-se, a partir da Figura 3.9 e da Tabela 3.7, que os modelos proposto e convencional mantiveram, para o intervalo de coordenadas $x = [5, \dots, 35]$ e $y = [5, \dots, 35]$, um desempenho adequado similar ao auferido nos intervalos de coordenadas anteriores, uma vez que os valores apurados de erro não foram superiores a 5° para nenhum dos arranjos de antenas. A técnica que aplica o algoritmo MUSIC apresentou um desempenho similar ao alcançado pelo intervalo de coordenadas $x = [15, \dots, 25]$ e $y = [15, \dots, 25]$ para todos os arranjos de antenas, onde o erro foi superior a 18° em todos os casos de amostras, chegando a 43.0122° nas simulações realizadas com 1 amostra para o arranjo 1.

Portanto, conclui-se que a técnica de estimação da direção de chegada aplicada neste projeto para o caso de quatro arranjos de antenas diferentes apresenta um desempenho satisfatório para posições reais do emissor mais próximas ou mais afastadas dos arranjos de antenas, mantendo os valores apurados de erro quadrático abaixo dos 5° para todos os intervalos de coordenadas utilizados, assim como a técnica convencional. É importante ressaltar que a técnica de estimação da direção de chegada utilizada neste trabalho apresentou resultados melhores quando aplicada em um sistema com quatro arranjos de antenas, em comparação aos resultados obtidos em um sistema com dois arranjos de antenas. Isso decorre do fato de que os quatro arranjos estão dispostos de maneira a formar um quadrilátero e as coordenadas que representam a posição real do emissor estão sempre contidas no interior desse quadrilátero, o que limita as possíveis direções de chegada para um intervalo de -90° até $+90^\circ$.

Entretanto, a técnica que aplica o algoritmo MUSIC apresentou um resultado satisfatório apenas para o primeiro intervalo, $x = [25, \dots, 26]$ e $y = [20, \dots, 21]$, com valores de coordenadas muito específicos e para um número de amostras maior que 1. Como já descrito anteriormente, o algoritmo MUSIC apresenta um desempenho inferior, em comparação com a técnica aplicada neste trabalho, para um sistema de baixo custo, no qual não há calibração e nem a utilização de *hardware* complexo.

3.3 Simulação da Estimação da Posição do Emissor

Para as simulações das estimativas da posição do emissor realizadas neste trabalho, o espaçamento angular ϕ entre as antenas foi mantido em 40° , a partir do que foi apresentado em [7], o ruído \mathbf{n} presente na Equação 2.2 foi desconsiderado e foi variada apenas a posição θ do emissor do sinal.

Aplica-se a técnica proposta em [7] em cada arranjo de antenas a fim de se obter a estimação da direção de chegada em cada arranjo de antenas e depois utiliza-se as Equações 2.17 e 2.18 para a estimação da coordenada que corresponde à posição do emissor, para o sistema composto por dois arranjos de antenas, e as Equações 2.19, 2.20

e 2.21 para a estimação da coordenada que corresponde à posição do emissor, para o sistema composto por quatro arranjos de antenas. Para apurar o desempenho das técnicas aplicadas, são plotados, para cada arranjo de antena, gráficos da RMSE que comparam os resultados obtidos pelo modelo utilizado neste trabalho com os resultados obtidos pelos modelos estado da arte, para cada técnica de estimação da posição.

Para a estimação da posição por meio do uso de duas antenas foi realizada a interseção das retas que representam a estimação da direção de chegada para cada arranjo. A Figura 3.10 apresenta de forma gráfica o ponto de interseção, cujas coordenadas representam a posição estimada do emissor, e o ponto representa a posição real do emissor. Pode-se observar, também, que a distância entre os arranjos de antenas é $\Delta = 30$ metros para todas as simulações.

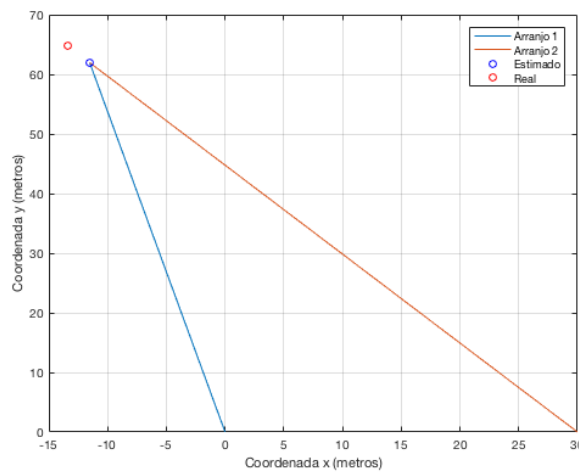


Figura 3.10: Estimação da Posição para dois arranjos de antenas por meio da interseção de retas.

Já para a estimação da posição por meio do uso de quatro antenas foi realizada a triangulação das retas que representam a estimação da direção de chegada para cada arranjo. A Figura 3.11 apresenta de forma gráfica o ponto médio da área formada pela triangulação das retas, cujas coordenadas representam a posição estimada do emissor, e o ponto cujas coordenadas representam a posição real do emissor. Observa-se ainda, que a distância entre cada arranjo de antenas é $\Delta = 40$ metros para todas as simulações.

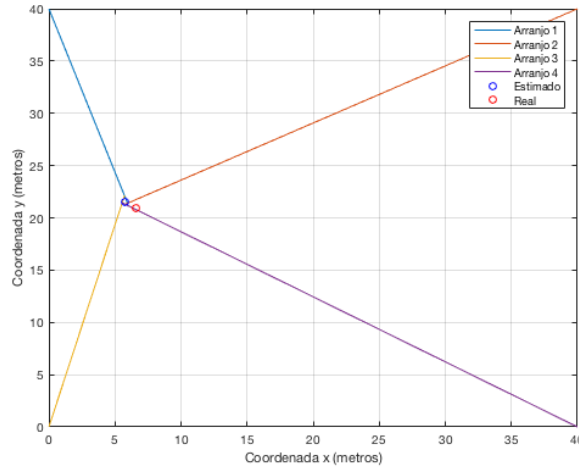


Figura 3.11: Estimação da Posição para quatro arranjos de antenas por meio da triangulação de retas.

Para fins de análise, utiliza-se a RMSE para avaliar o desempenho das técnicas de estimação da posição do emissor, a partir da direção de chegada estimada, aplicada neste projeto em comparação com os resultados de estimação da posição do emissor obtidos por meio da direção de chegada estimada por meio dos modelos estado da arte em cada arranjo de antenas. A RMSE é calculada a partir da seguinte expressão:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (\|\hat{\mathbf{p}}_i - \mathbf{p}_i\|)^2}{N}}. \quad (3.2)$$

Cabe destacar que os resultados foram obtidos por meio do método de simulações de Monte Carlo, onde os valores de coordenadas reais do emissor foram gerados de forma aleatória para cada simulação e o resultado final do RMSE foi obtido por meio da média dos valores obtidos pelas simulações de Monte Carlo. Também foram utilizados valores diferentes de amostras sobre as quais foram realizadas as simulações de Monte Carlo, onde iniciou-se com 1 amostra, depois 5 e, a partir daí, aumentou-se o número de amostras de 5 em 5, até 40 amostras.

3.3.1 Análise dos Resultado para Dois Arranjos de Antenas

Assim como para a estimação da direção de chegada, foram realizados testes com posições reais do emissor geradas de forma aleatória e dentro de uma variedade de áreas de possíveis coordenadas cartesianas, com valores de x e $y \in \mathbb{Q}$, a fim de observar para quais valores de posição real o modelo apresenta um resultado satisfatório. Tanto para a estimação da direção de chegada quanto para a estimação da posição do emissor foram utilizados os mesmos intervalos de coordenadas descritos na Subseção 3.2.1, uma vez que a técnica de

estimação da posição utiliza os valores de direção de chegada estimados. Esses intervalos foram selecionados para que fosse possível apurar o desempenho dos modelos para posições simuladas da fonte do sinal mais próximas e mais distantes dos arranjos de antenas.

Primeiro, foi gerado o gráfico de RMSE para o modelo proposto e para os modelos estado da arte apresentado na Figura 3.12a. A Figura 3.12b apresenta de forma gráfica as coordenadas das posições reais da fonte de sinal. Os gráficos foram gerados a partir do intervalo de coordenadas $x = [25, \dots, 26]$ e $y = [20, \dots, 21]$.

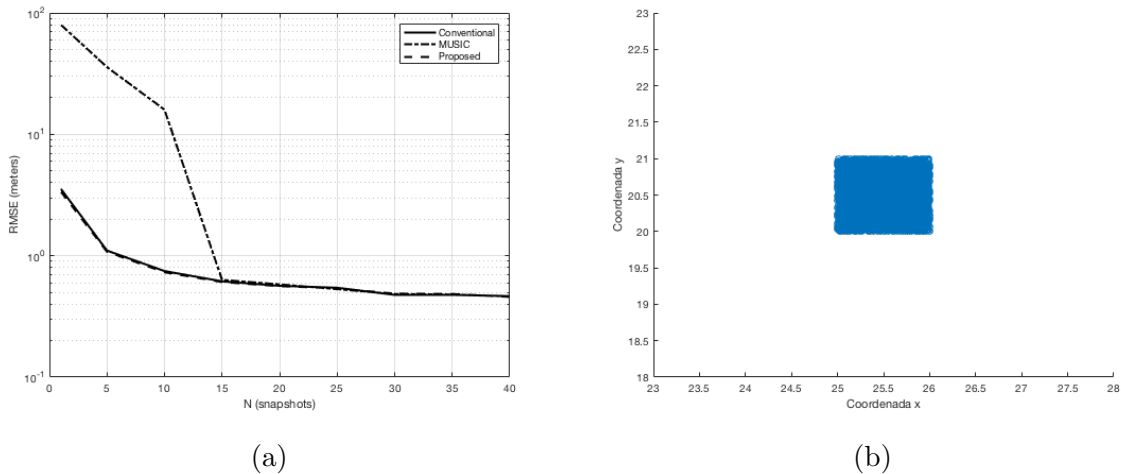


Figura 3.12: (a) RMSE das estimações da posição do emissor do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas e (b) pontos que representam as posições simuladas do emissor.

Tabela 3.8: Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo para o intervalo $x = [25, \dots, 26]$ e $y = [20, \dots, 21]$.

Técnica	RMSE(metros)
Proposta	[3.3668 1.0796 0.7313 0.6075 0.5614 0.5394 0.4870 0.4840 0.4584]
Convencional	[3.5463 1.1029 0.7477 0.6153 0.5654 0.5448 0.4763 0.4764 0.4650]
MUSIC	[79.7330 35.8047 15.9569 0.6324 0.5805 0.5311 0.4834 0.4794 0.4626]

Observa-se, a partir da Figura 3.12 e da Tabela 3.8, que os modelos proposto e convencional apresentaram resultados adequados para o intervalo $x = [25, \dots, 26]$ e $y = [20, \dots, 21]$, onde o maior valor de erro é de 3.5463 metros, para as simulações realizadas com 1 amostra pelo modelo convencional. Já o modelo que aplica o algoritmo MUSIC obteve um resultado inferior para as simulações realizadas com 10 amostras, onde apresentou um erro de 15.9569 metros, e ainda apresentou dois valores não esperados para as simulações realizadas com 1 e 5 amostra, onde apresentou valores de erro superiores a 21 metros, distância máxima entre a fonte de sinal e os arranjos de antenas para este intervalo.

Depois, foi gerado o gráfico de RMSE para o modelo proposto e para os modelos estado da arte apresentado na Figura 3.13a. A Figura 3.13b apresenta de forma gráfica as coordenadas das posições reais da fonte de sinal. Os gráficos foram gerados a partir do intervalo de coordenadas $x = [15, \dots, 30]$ e $y = [20, \dots, 40]$.

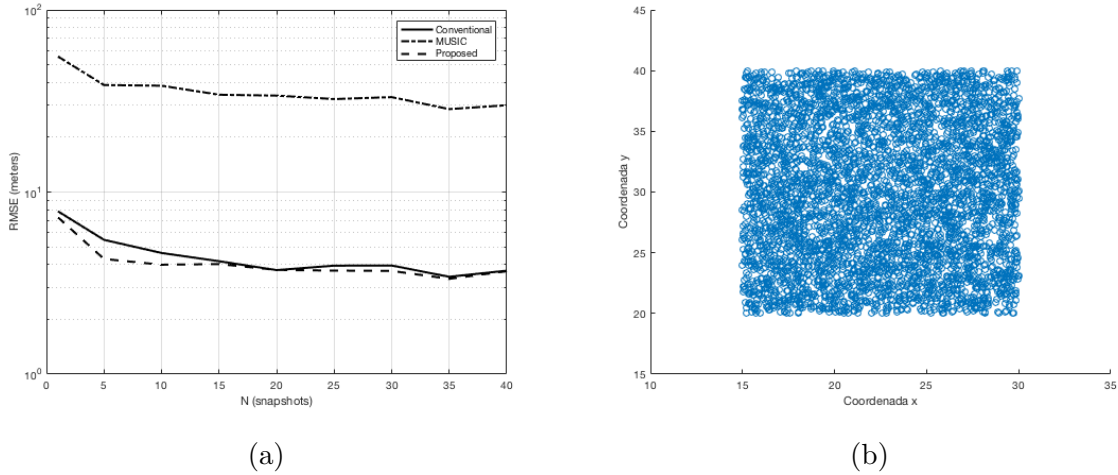


Figura 3.13: (a) RMSE das estimações da posição do emissor do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas e (b) pontos que representam as posições simuladas.

Tabela 3.9: Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo para o intervalo $x = [15, \dots, 30]$ e $y = [20, \dots, 40]$.

Técnica	RMSE(metros)
Proposta	[7.2646 4.2893 3.9879 4.0226 3.7348 3.7032 3.6887 3.3365 3.6741]
Convencional	[7.8397 5.4655 4.6290 4.1700 3.7266 3.9418 3.9491 3.4247 3.6999]
MUSIC	[55.4967 38.6878 38.3545 34.2156 33.8382 32.3967 33.2040 28.5301 29.9621]

A partir da Figura 3.13 e da Tabela 3.9, constata-se que com o aumento da distância entre a fonte do sinal e os arranjos de antenas receptoras, os resultados obtidos pelos três modelos apresentam uma redução de desempenho para o intervalo de coordenadas $x = [15, \dots, 30]$ e $y = [20, \dots, 40]$, em comparação com o resultado obtido pelo intervalo anterior. Os modelos proposto e convencional ainda apresentam um resultado adequado, com valores de erro abaixo de 6 metros, para as simulações realizadas com quase todos os valores de amostras, com exceção das simulações com 1 amostra, onde os modelos proposto e convencional apresentam valores de erro de 7.2646 metros e 7.8397 metros, respectivamente. O modelo que aplica o algoritmo MUSIC obteve um resultado ruim para todos os casos de amostras, em comparação com os outros modelos, com valores inesperados para as simulações realizadas com 1 amostra, onde o valor de erro foi

superior a 40 metros, distância máxima entre a fonte do sinal e os arranjos de antenas. Para as simulações com os demais valores de amostras, os valores de erro ficaram entre 28.5301 metros e 38.6878 metros, o que representa um resultado muito inferior comparado aos outros modelos.

Em seguida, foi gerado o gráfico de RMSE para o modelo proposto e para os modelos estado da arte apresentado na Figura 3.14a. A Figura 3.14b apresenta de forma gráfica as coordenadas das posições reais da fonte de sinal. Os gráficos foram gerados a partir do intervalo de coordenadas utilizado foi $x = [-15, \dots, 45]$ e $y = [20, \dots, 60]$.

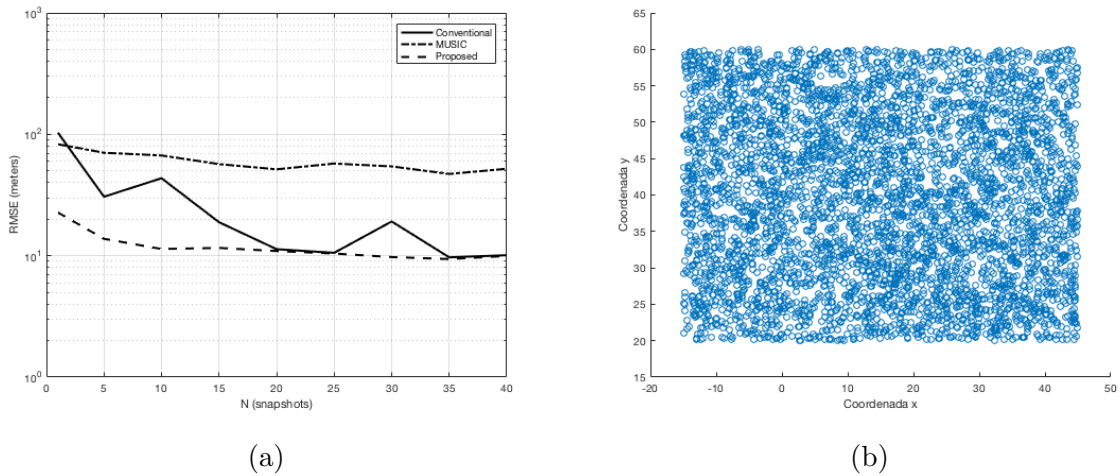


Figura 3.14: (a) RMSE das estimações da posição do emissor do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas e (b) pontos que representam as posições simuladas do emissor.

Tabela 3.10: Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo para o intervalo $x = [-15, \dots, 45]$ e $y = [20, \dots, 60]$.

Técnica	RMSE(metros)
Proposta	[22.6885 13.7868 11.3656 11.5972 10.9274 10.4303 9.7530 9.3918 9.9576]
Convencional	[103.1587 30.6252 43.4811 18.8779 11.3204 10.5677 19.1526 9.7015 10.1011]
MUSIC	[82.9033 70.5004 66.9643 56.8339 51.5002 57.4724 54.4078 47.1643 52.0642]

Observa-se, a partir da Figura 3.14 e da Tabela 3.10, que os modelos proposto e convencional apresentaram, para o intervalo de coordenadas $x = [-15, \dots, 45]$ e $y = [20, \dots, 60]$, uma redução significativa no desempenho. A técnica proposta apresentou um valor de erro de 22.6885 metros, bem acima do resultado obtido em intervalos anteriores para as simulações com 1 amostra, mas manteve os valores de erro abaixo de 14 metros para as simulações com os demais valores de amostras.

A técnica convencional apresentou um resultado não esperado para as simulações com 1 amostra, onde o valor do erro foi superior a 60 metros, ou seja, o erro foi superior à distância máxima entre a fonte do sinal e os arranjos de antenas. Para as simulações realizadas com 5 e 10 amostras o resultado obtido foi inferior ao obtido a partir dos intervalos anteriores, onde os valores de erro foram de 30.6252 metros para o primeiro caso e 43.4811 metros para o segundo caso, enquanto, para os demais valores de amostras, o desempenho obtido foi adequado, pois os valores de erro ficaram entre 8 metros e 20 metros. Já o modelo que aplica o algoritmo MUSIC, apresentou um desempenho inadequado quando comparado com o obtido a partir dos intervalos anteriores, onde o menor valor de erro obtido foi de 47.1643 metros e apresentou valores fora da curva para as simulações realizadas com 1, 5 e 10 amostras, onde os valores de erro foram superiores a 60 metros.

Por fim, foi gerado o gráfico de RMSE para o modelo proposto e para os modelos estado da arte apresentado na Figura 3.15a. A Figura 3.15b apresenta de forma gráfica as coordenadas das posições reais da fonte de sinal. Os gráficos foram gerados a partir do intervalo de coordenadas $x = [-30, \dots, 60]$ e $y = [20, \dots, 100]$.

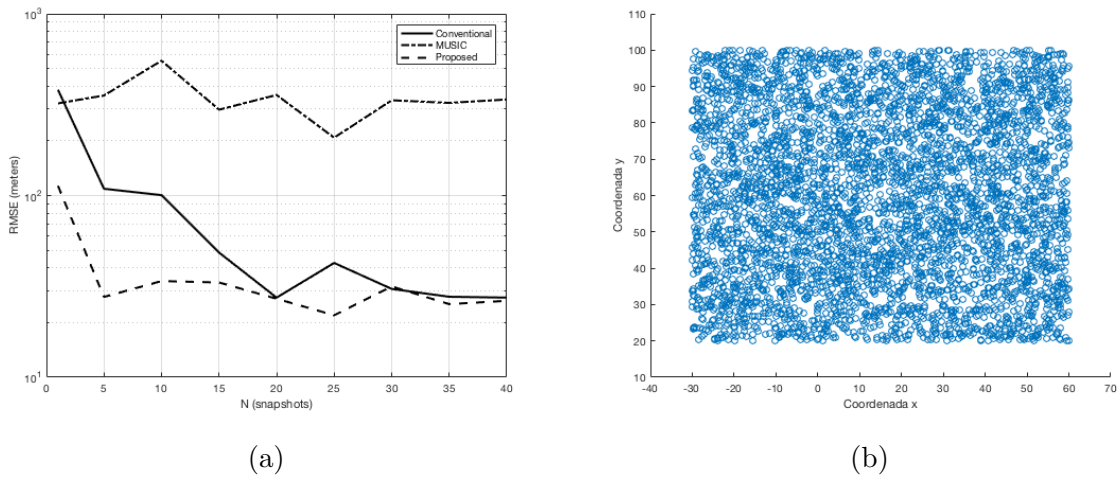


Figura 3.15: (a) RMSE das estimações da posição do emissor do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas e (b) pontos que representam as posições simuladas do emissor.

Tabela 3.11: Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo para o intervalo $x = [-30, \dots, 60]$ e $y = [20, \dots, 100]$.

Técnica	RMSE(metros)
Proposta	[113.2026 27.6696 33.8349 33.2363 27.0430 21.9376 31.6152 25.2650 26.3544]
Convencional	[382.5665 108.9915 100.4940 48.5488 27.4358 42.5653 30.6359 27.7327 27.4404]
MUSIC	[321.5837 355.3558 552.0747 297.0194 357.7989 208.2583 334.3541 323.5466 337.8867]

Ao analisar a Figura 3.15 e a Tabela 3.11, constata-se que os resultados obtidos pelos três modelos apresentam uma redução no desempenho para o intervalo $x = [-30, \dots, 60]$ e $y = [20, \dots, 100]$. A técnica proposta apresentou um valor fora da curva para as simulações realizadas com 1 amostra, onde o erro foi superior a 100 metros, ou seja, o erro foi superior à distância máxima entre a fonte do sinal e os arranjos de antenas. Para as simulações realizadas com os demais valores de amostras, os valores de erro ficaram entre 21 metros e 34 metros.

A técnica convencional apresentou um resultado não esperado para as simulações com 1, 5 e 10 amostras, onde o erro foi superior a 100 metros, ou seja, o erro foi superior à distância máxima entre a fonte do sinal e os arranjos de antenas. Para as simulações com os demais valores de amostras, os valores de erro ficaram entre 27 metros e 49 metros. Já o modelo que aplica o algoritmo MUSIC, apresentou valores fora da curva para todas as simulações realizadas, onde apresentou valores de erro superiores a 100 metros.

Portanto, conclui-se que a técnica de estimação da posição do emissor aplicada neste projeto para o caso de dois arranjos de antenas diferentes apresenta um desempenho satisfatório para posições reais do emissor mais próximas dos arranjos de antenas, porém ao se aumentar a distância entre a fonte do sinal e os arranjos de antenas receptoras, o desempenho da técnica sofre uma redução. Isso decorre do fato de que para distâncias maiores, as posições simuladas do emissor ficam em ângulos muito oblíquos em relação aos arranjos de antenas e esses pontos apresentam valores de erros de estimação maiores. Isso pode ser visto por meio da comparação entre os gráficos apresentados pelas Figuras 3.3 e 3.12, que representam os gráficos dos erros das estimatórias da direção de chegada e posição do emissor para o intervalo com coordenadas simuladas mais próximas dos arranjos de antenas, e os gráficos apresentados pelas Figuras 3.6 e 3.15, que representam os gráficos dos erros das estimatórias da direção de chegada e posição do emissor para o intervalo com coordenadas simuladas mais distantes dos arranjos de antenas.

Vale destacar que a técnica que aplica o algoritmo MUSIC apresentou um resultado pior em relação às outras, pelo fato de, como já descrito anteriormente, o algoritmo MUSIC apresentar um desempenho inferior em relação ao resultado obtido pelos outros modelos para um sistema de prateleira de baixo custo, no qual não há calibração. O fato de ser um algoritmo muito sensível aos erros no sistema formado pelos arranjos de antenas de prateleira utilizado deve ser investigado para que seja possível aprimorar esta técnica para este tipo de cenário e obter maior acurácia na estimação da posição do emissor.

3.3.2 Análise dos Resultado para Quatro Arranjos de Antenas

Para atestar a validação da técnica de estimação da posição para quatro arranjos de antenas as coordenadas do emissor do sinal foram geradas de forma aleatória e dentro

de uma variedade de áreas de possíveis coordenadas cartesianas, com valores de x e $y \in \mathbb{Q}$. Como descrito na Subseção 2.3.2, os arranjos de antenas estão dispostos em um formato quadrático e, para este trabalho, a distância entre os arranjos é de $\Delta = 40$ metros. Tanto para a estimação da direção de chegada quanto para a estimação da posição do emissor foram utilizados os mesmos intervalos de coordenadas descritos na Subseção 3.2.2, uma vez que a técnica de estimação da posição utiliza os valores de direção de chegada estimados, e os intervalos foram selecionados de tal forma para que fosse possível auferir o desempenho dos modelos para posições simuladas do emissor mais próximas e mais distantes dos arranjos de antenas.

Primeiro, foi gerado o gráfico de RMSE para o modelo proposto e para os modelos estado da arte apresentado na Figura 3.16a. A Figura 3.16b apresenta de forma gráfica as coordenadas das posições reais da fonte de sinal. Os gráficos foram gerados a partir do intervalo de coordenadas $x = [25, \dots, 26]$ e $y = [20, \dots, 21]$.

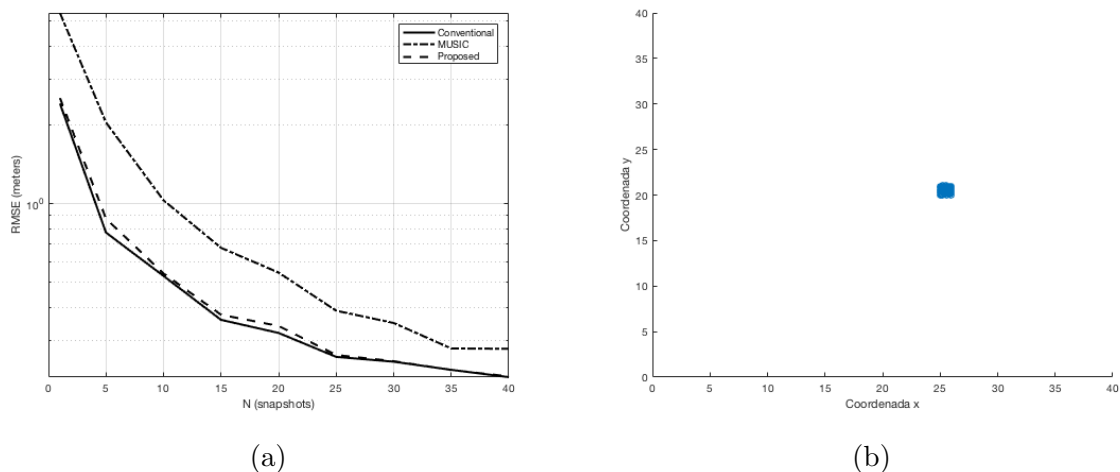


Figura 3.16: (a) RMSE das estimações da posição do emissor do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas e (b) pontos que representam a posição real do emissor.

Tabela 3.12: Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo para o intervalo $x = [25, \dots, 26]$ e $y = [20, \dots, 21]$.

Técnica	RMSE(metros)
Proposta	[2.5394 0.8759 0.5408 0.3758 0.3404 0.2635 0.2495 0.2310 0.2182]
Convencional	[2.4172 0.7756 0.5289 0.3592 0.3201 0.2592 0.2485 0.2313 0.2168]
MUSIC	[5.3743 2.0464 1.0305 0.6777 0.5448 0.3895 0.3495 0.2792 0.2784]

Observa-se, a partir da Figura 3.16 e da Tabela 3.12, que os modelos proposto e convencional apresentaram resultados adequados para o intervalo $x = [25, \dots, 26]$ e $y = [20, \dots, 21]$,

com valores de erro abaixo de 3 metros. Já o modelo que aplica o algoritmo MUSIC obteve um desempenho inferior em relação aos outros modelos para as simulações realizadas com 1 amostra, onde apresentou um valor de erro acima 3 metros, enquanto para as simulações com os demais valores de amostras os valores de erro apresentados foram menores que 3 metros.

Em seguida, foi gerado o gráfico de RMSE para o modelo proposto e para os modelos estado da arte apresentado na Figura 3.17a. A Figura 3.17b apresenta de forma gráfica as coordenadas das posições reais da fonte de sinal. Os gráficos foram gerados a partir do intervalo de coordenadas $x = [15, \dots, 25]$ e $y = [15, \dots, 25]$.

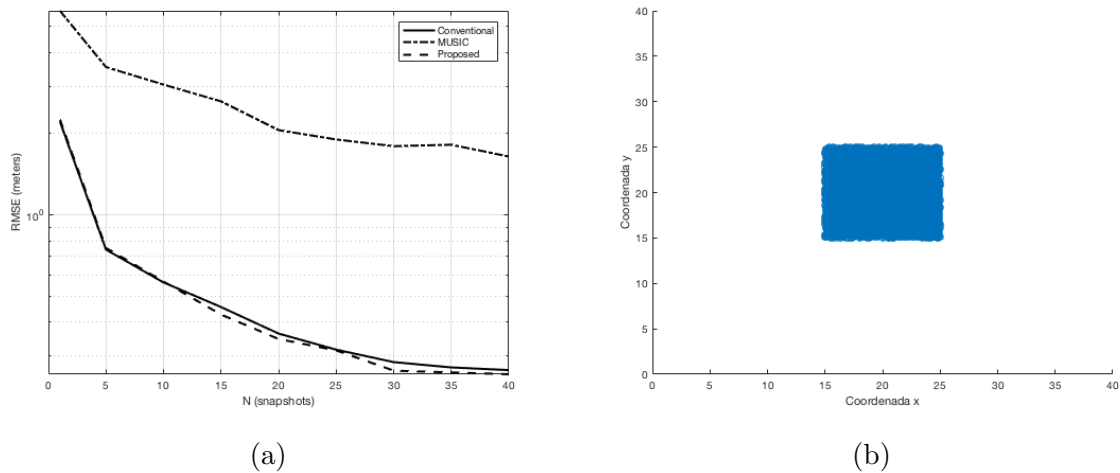


Figura 3.17: (a) RMSE das estimações da posição do emissor do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas e (b) pontos que representam a posição real do emissor.

Tabela 3.13: Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo para o intervalo $x = [15, \dots, 25]$ e $y = [15, \dots, 25]$.

Técnica	RMSE(metros)
Proposta	[2.2596 0.7542 0.5659 0.4269 0.3462 0.3142 0.2643 0.2603 0.2563]
Convencional	[2.2200 0.7436 0.5616 0.4550 0.3628 0.3163 0.2843 0.2717 0.2656]
MUSIC	[5.7133 3.5345 3.0433 2.6363 2.0627 1.9043 1.7981 1.8210 1.6461]

A partir da Figura 3.17 e da Tabela 3.13, constata-se que os modelos proposto e convencional apresentaram resultados adequados para o intervalo $x = [15, \dots, 25]$ e $y = [15, \dots, 25]$, ainda mantendo os valores de erro abaixo de 3 metros. Contudo, o modelo que aplica o algoritmo MUSIC obteve uma redução do desempenho, quando comparado com o intervalo anterior, pois, para as simulações com 1, 5 e 10 amostras, apresentou valores de

erro de 5.7133 metros, 3.5345 metros e 3.0433 metros, respectivamente, enquanto para as demais simulações os valores de erro ficaram próximos ou abaixo de 3 metros.

Por fim, foi gerado o gráfico de RMSE para o modelo proposto e para os modelos estado da arte apresentado na Figura 3.18a. A Figura 3.18b apresenta de forma gráfica as coordenadas das posições reais da fonte de sinal. Os gráficos foram gerados a partir do intervalo de coordenadas $x = [5, \dots, 35]$ e $y = [5, \dots, 35]$.

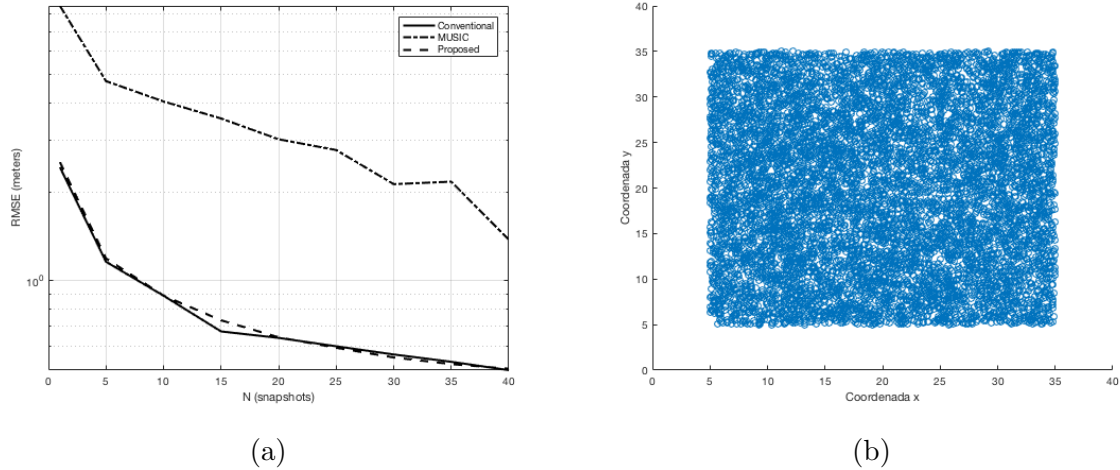


Figura 3.18: (a) RMSE das estimações da posição do emissor do modelo proposto e dos modelos estado da arte para o arranjo de antenas e (b) pontos que representam a posição real do emissor.

Tabela 3.14: Tabela contendo os valores de RMSE para cada número de amostras em relação a cada modelo para o intervalo $x = [5, \dots, 35]$ e $y = [5, \dots, 35]$.

Técnica	RMSE(metros)
Proposta	[2.5250 1.1911 0.8909 0.7346 0.6435 0.5927 0.5497 0.5218 0.5034]
Convencional	[2.4256 1.1602 0.8901 0.6734 0.6404 0.5998 0.5627 0.5314 0.4978]
MUSIC	[8.5437 4.7511 4.0526 3.5492 3.0171 2.7748 2.1258 2.1676 1.3784]

Ao analisar a Figura 3.18 e a Tabela 3.14, constata-se que para os modelos convencional e proposto os resultados obtidos são adequados para o intervalo $x = [5 \dots, 35]$ e $y = [5, \dots, 35]$, pois os valores de erro apresentados para as simulações com qualquer número de amostras não foi superior a 3 metros. A técnica que aplica o algoritmo MUSIC apresentou um desempenho inferior em relação aos intervalos anteriores, onde, para as simulações com 1, 5 e 10 amostras, os valores de erro foram de 8.5437 metros, 4.7511 metros e 4.0526 metros enquanto para as demais simulações os valores de erro ficaram entre 1.3784 metro e 3.5492 metros.

Portanto, conclui-se que a técnica de estimação da posição do emissor aplicada neste projeto para o caso de quatro arranjos de antenas diferentes apresenta um desempenho satisfatório para posições reais do emissor mais próximas e mais distantes dos arranjos de antenas. Apesar da piora no resultado da estimação da direção de chegada para situações nas quais o emissor pode estar posicionado perto dos arranjos de antenas, como apresentado na Subseção 3.2.2, a técnica aplicada para a estimação da posição obteve um desempenho razoável, onde em poucas ocasiões os valores de erro foram superiores a 3 metros, inclusive para a técnica que utiliza o algoritmo MUSIC. Isso decorre do fato de que a posição do emissor é calculada com base nos senos e cossenos dos ângulos que representam as direções de chegada estimadas para cada arranjo de antenas, ou seja, a diferença entre as direções de chegada real e estimada não exercem a mesma influência no resultado das posições estimadas como na técnica de estimação da posição do emissor do sinal para um sistema com dois arranjos de antenas, pois para um intervalo de -90° até $+90^\circ$, os senos variam de -1 a 1 e os cossenos de 0 a 1.

Vale destacar que a técnica que aplica o algoritmo MUSIC apresentou um resultado pior em relação às outras, pelo fato de, como já descrito anteriormente, o algoritmo MUSIC apresentar um desempenho ruim para um sistema de prateleira de baixo custo, no qual não há calibração.

Capítulo 4

Conclusão e Próximos Passos

O principal objetivo deste trabalho foi o de aplicar a técnica de estimação da direção de chegada baseada na potência do sinal recebido, para um sistema de antenas direcionais de baixo custo, apresentada em [7] e [8], para dois sistemas diferente, onde um era composto por dois arranjos de antenas e o outro composto por quatro arranjos de antenas, e, a partir da direção estimada em cada arranjo, obter a estimação da posição do emissor do sinal (drone).

Para o sistema composto por dois arranjos de antenas, a posição da fonte do sinal foi estimada por meio da interseção das retas geradas pelo ponto que corresponde à posição de cada arranjo de antenas e o ângulo $\hat{\theta}$ que corresponde à direção estimada em cada arranjo. Para o sistema composto por quatro arranjos de antenas, a posição da fonte do sinal foi estimada por meio da triangulação das direções de chegada estimadas para cada arranjo de antenas baseada na técnica de detecção e localização de emissores no interior de arranjos de múltiplos sensores apresentada em [9].

Na Seção 2.2 foi detalhada a técnica de estimação da direção de chegada do emissor do sinal para um arranjo de antenas aplicada neste projeto. Como apresentado na Subseção 2.2.3, foram computados dois vetores, $p(\theta)$ e $g(\theta)$, que correspondem, respectivamente, às diferenças entre as potências de sinal recebido em cada antena e às diferenças dos padrões de ganho de diretividade de cada antena do arranjo. Depois, calculou-se a resposta espacial $P(\theta)$ por meio da Equação 2.11 e a direção de chegada estimada foi definida a partir da avaliação do valor máximo da resposta espacial por meio da Equação 2.12. Destaca-se que essa técnica é aplicada para cada arranjo de antenas, tanto no sistema composto por dois arranjos de antenas quanto no sistema composto por quatro arranjos de antenas.

Na Seção 2.3 foram apresentadas e detalhadas as técnicas de estimação da posição do emissor do sinal para os sistemas compostos por dois e quatro arranjos de antenas. Na Subseção 2.3.1, foi calculado, primeiramente, o valor de \hat{x} utilizando os valores de

$\hat{\theta}_1$ e $\hat{\theta}_2$, que representam a direção de chegada estimada pelos arranjos de antenas, por meio da Equação 2.17. Depois, foi calculado o valor de \hat{y} utilizando os valores de $\hat{\theta}_1$ e $\hat{\theta}_2$, que representam a direção de chegada estimada pelos arranjos de antenas, por meio da Equação 2.18. Esses valores correspondem às coordenadas do ponto de interseção das retas que representam as direções de chegada estimadas em cada arranjo de antenas e, assim, constituem a coordenada da posição estimada para o sistema com dois arranjos de antenas.

Na Subseção 2.3.2, foram calculados, primeiramente, os valores das retas $\hat{d}_{1,2}$, $\hat{d}_{2,4}$, $\hat{d}_{3,1}$ e $\hat{d}_{4,3}$, onde os arranjos são tomados dois a dois conforme os índices, utilizando os valores de $\hat{\theta}_1$, $\hat{\theta}_2$, $\hat{\theta}_3$ e $\hat{\theta}_4$, que representam a direção de chegada estimada pelos arranjos de antenas, por meio da Equação 2.19. Depois, foram calculados os valores das coordenadas dos pontos $(\hat{x}_{1,2}, \hat{y}_{1,2})$, $(\hat{x}_{2,4}, \hat{y}_{2,4})$, $(\hat{x}_{3,1}, \hat{y}_{3,1})$ e $(\hat{x}_{4,3}, \hat{y}_{4,3})$ que representam as posições estimadas por cada par de arranjos, tomados conforme descrito nos índices, utilizando os valores de $\hat{d}_{1,2}$, $\hat{d}_{2,4}$, $\hat{d}_{3,1}$, $\hat{d}_{4,3}$ (distâncias calculadas pela Equação 2.19) e $\hat{\theta}_1$, $\hat{\theta}_2$, $\hat{\theta}_3$ e $\hat{\theta}_4$, que representam a direção de chegada estimada pelos arranjos de antenas, por meio das Equações 2.20 e 2.21. Por fim, a coordenada (\hat{x}, \hat{y}) do ponto que corresponde à posição estimada foi obtida por meio da média aritmética das coordenadas $(\hat{x}_{1,2}, \hat{y}_{1,2})$, $(\hat{x}_{2,4}, \hat{y}_{2,4})$, $(\hat{x}_{3,1}, \hat{y}_{3,1})$ e $(\hat{x}_{4,3}, \hat{y}_{4,3})$.

Na Seção 3.2, foi descrita a simulação realizada da técnica de estimação da direção de chegada para os sistemas compostos por dois e quatro arranjos de antenas, a fim de apurar o desempenho da técnica aplicada a situação. Ao analisar os resultados obtidos pelas simulações para o caso de dois arranjos de antenas, descrito na Subseção 3.2.1, concluiu-se que a técnica de estimação da direção de chegada de emissores de sinal, como por exemplo drones, aplicada apresenta um desempenho satisfatório para distâncias entre a fonte do sinal e os arranjos de antenas curtas e longas. Após analisar os resultados obtidos pelas simulações para o caso de quatro arranjos de antenas, descrito na Subseção 3.2.2, concluiu-se que a técnica de estimação da direção de chegada de emissores de sinal, como por exemplo drones, aplicada apresenta um desempenho satisfatório para posições reais do emissor mais próximas ou mais afastadas dos arranjos de antenas.

Na Seção 3.3, foram descritas as simulações realizadas das técnicas de estimação da posição para os sistemas compostos por dois e quatro arranjos de antenas, a fim de se auferir o desempenho de cada técnica. Ao analisar os resultados obtidos pelas simulações para o caso de dois arranjos de antenas, descrito na Subseção 3.3.1, concluiu-se que a técnica de estimação da posição do emissor aplicada neste projeto para o caso de dois arranjos de antenas apresenta um desempenho satisfatório para posições reais do emissor mais próximas dos arranjos de antenas, porém, ao se aumentar a distância entre a fonte do sinal e os arranjos de antenas receptoras, o desempenho da técnica sofre uma

redução significativa, ou seja, a técnica se mostrou promissora para curtas distâncias. Após analisar os resultados obtidos pelas simulações para o caso de quatro arranjos de antenas, descrito na Subseção 3.3.2, concluiu-se que a técnica de estimação da posição do emissor aplicada neste projeto para o caso de quatro arranjos de antenas apresenta um desempenho satisfatório para posições reais do emissor mais próximas e mais distantes dos arranjos de antenas.

Os resultados das simulações realizadas serviram como parâmetro para verificar a validade da técnica de estimação da direção de chegada aplicada para sistemas com dois e quatro arranjos de antenas e das técnicas de estimação da posição do emissor aplicadas para sistemas compostos por dois e quatro arranjos de antenas. Portanto, o próximo passo a ser tomado é a realização de um experimento de campo para apurar a validade das técnicas em um ambiente real.

Primeiro, deve ser realizado um experimento com uma fonte, com posição fixa em $x = 25$ e $y = 26$ (compreendida no intervalo que apresentou os melhores resultados nas simulações), que emita sinais do mesmo tipo daqueles emitidos por drones e dois arranjos de antenas de baixo custo, com 30 metros de distância entre eles (distância utilizada nas simulações), a fim de apurar o desempenho das técnicas de estimação da direção de chegada e da posição do emissor para dois arranjos de antenas em um ambiente real.

Depois, deve ser realizado um experimento com uma fonte, com posição fixa em $x = 25$ e $y = 26$ (compreendida no intervalo que apresentou os melhores resultados nas simulações), que emita sinais do mesmo tipo daqueles emitidos por drones e quatro arranjos de antenas de baixo custo, dispostos em formato quadrático com 40 metros de distância entre eles (distância utilizada nas simulações), a fim de apurar o desempenho das técnicas de estimação da direção de chegada e da posição do emissor para quatro arranjos de antenas em um ambiente real.

Referências

- [1] Insider, Business: *Exploring the latest drone technology for commercial, industrial and military drone uses*. Disponível em: <https://www.businessinsider.com/drone-technology-uses-2017-7>, 2017.
- [2] Reuters: *Drone hits commercial airliner in canada, no injuries*. Disponível em: <https://www.reuters.com/article/us-canada-transport-drones/drone-hits-commercial-airliner-in-canada-no-injuries-idUSKBN1CK0TW>, 2017.
- [3] Reuters: *Drone operator caused u.s. army helicopter collision: safety board*. Disponível em: <https://www.reuters.com/article/us-usa-military-drone/drone-operator-caused-u-s-army-helicopter-collision-safety-board-idUSKBN1E82EG>, 2017.
- [4] G1, Globo: *Drone sobre congonhas pode causar prejuízo de mais de 1 milhão de reais, estima associação de empresas aéreas*. Disponível em: <https://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/drone-sobre-congonhas-causou-prejuizo-de-mais-de-r-1-milhao-estima-associacao.ghtml>, 2017.
- [5] Reuters: *Two flights diverted from dubai due to suspected drones*. Disponível em: <https://www.reuters.com/article/us-emirates-security-airport/two-flights-diverted-from-dubai-due-to-suspected-drones-idUSKBN1W70GM>, 2017.
- [6] Reports, Allianz: *Rise of the drones - managing the unique risks associated with unmanned aircraft systems*. Disponível em: <https://www.agcs.allianz.com/content/dam/onemarketing/agcs/agcs/reports/AGCS-Riseofthedrones-report.pdf>, 2016.
- [7] R. K. Miranda, D. A. Ando, J. P. C. L. da Costa e M. T. de Oliveira: *Enhanced direction of arrival estimation via received signal strength of directional antennas*. 2018 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT), páginas 162–167, 2018.
- [8] D. A. Ando, R. K. Miranda, J. P. C. L. da Costa e M. T. de Oliveira: *A novel direction of arrival estimation algorithm via received signal strength of directional antenna*. 2018 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS), páginas 1–5, 2018.
- [9] J. P. A. Maranhão, J. P. C. L. da Costa, R. T. de Sousa A. J. de Barros Braga e G. Del Galdo: *Antenna array based framework with multipath mitigation for signal emitter detection and localization*. 11th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS), páginas 1–5, 2017.

- [10] A. Cidronali, S. Maddio, G. Giorgetti e G. Manes: *Analysis and performance of a smart antenna for 2.45-ghz single anchor indoor positioning*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, páginas 21–31, 2010.
- [11] Z. Chen, G. Gokeda e Y. Yu: *Introduction to direction-of-arrival estimation*. Artech House, 2010, ISBN 13: 978-1-59693-089-6.
- [12] Krim, H. e M. Viberg: *Two decades of array signal processing research: The parametric approach*. IEEE Signal Processing Magazine, p. 67-94, 1996.
- [13] Wax, M.: *Detection and estimation of superimposed signals*. Ph.D. dissertation, Stanford University, 1985.
- [14] Muhamed, R. e T. S. Rapport: *Comparison of conventional subspace-based doa estimation algorithms with those employing property-restoral techniques: simulation and measurements*. ICUPC - 5th International Conference on Universal Personal Communications, páginas 1004–1008 vol.2, 1996.
- [15] Uluskan, S. e T. Filik: *Rss based direction finding via array of directional antennas with normal density distribution in magnitude*. 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2017.
- [16] Ash, J. e L. Potter: *Sensor network localization via received signal strength measurements with directional antennas*. Proceedings of the 2004 Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, 2004.
- [17] B. Zhang, F. Yu e Z. Zhang: *A high energy efficient localization algorithm for wireless sensor networks using directional antenna*. 2009 11th IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications, 2009.
- [18] J. Jiang, C. Lin e Y. Hsu: *Localization with rotatable directional antennas for wireless sensor networks*. 2010 39th International Conference on Parallel Processing Workshops, páginas 542–548, 2010.
- [19] Ou, C.: *A localization scheme for wireless sensor networks using mobile anchors with directional antennas*. IEEE Sensors Journal, páginas 1607–1616, 2011.
- [20] J. Jiang, C. Lin, F. Lin e S. Huang: *Aldr: Aoa localization with rssi differences of directional antennas for wireless sensor networks*. International Conference on Information Society (i-Society 2012), páginas 304–309, 2012.
- [21] Y. Chen, Z. Liu, X. Fu B. Liu e W. Zhao: *Theory underlying measurement of aoa with a rotating directional antenna*. Proceedings IEEE INFOCOM, páginas 2490–2498, 2013.
- [22] M. A. M. Marinho, P. R. L. Gondim e J. P. C. L. da Costa: *Continuous authentication via localization using triangulation of directions of arrival of line of sight components*. Forensic Computer Science - ICoFCS, The Ninth International Conference, páginas 31–35, 2015.

- [23] Shang, F. J. e H. X. Gao: *A localization model based on irregular quadrilateral for wireless sensor networks*. Instruments, Measurement, Electronics and Information Engineering, página 1000–1005, 2013.
- [24] F. Zeng, M. Yu, C. Zou e J. Gong: *An improved point-in-triangulation localization algorithm based on cosine theorem*. 8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, páginas 1–4, 2012.
- [25] stutzman, W. L. e G. A. Thiele: *Antenna theory and design - 3rd edition*. Wiley, 2012, ISBN 978-0-470-57664-9.