

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**EXPLORANDO A BANDA ULTRALARGA (UWB) PARA
POSICIONAMENTO E TRANSFERÊNCIA DE DADOS ENTRE
VANTs EM AMBIENTES COOPERATIVOS**

LUIS ANTONIO VIEIRA VITAL

UBERLÂNDIA, MG

2025

LUIS ANTONIO VIEIRA VITAL

**EXPLORANDO A BANDA ULTRALARGA (UWB) PARA
POSICIONAMENTO E TRANSFERÊNCIA DE DADOS ENTRE
VANTs EM AMBIENTES COOPERATIVOS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de mestre em ciências.

Área de Concentração: Sistemas de Energia

Orientador: Dr. Daniel Costa Ramos

UBERLÂNDIA, MG

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

V836e
2025 Vital, Luis Antonio Vieira, 1968-
Explorando a banda ultralarga (UWB) para posicionamento e
transferência de dados entre VANTs em ambientes cooperativos [recurso
eletrônico] / Luis Antonio Vieira Vital. - 2025.

Orientador: Daniel Costa Ramos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.5576>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia Elétrica. 2. Robótica. 3. Sistemas de comunicação
em banda larga. 4. Sistemas de transmissão de dados. I. Ramos, Daniel
Costa, 1984-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa
de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

Rejâne Maria da Silva
Bibliotecária-Documentalista – CRB6/1925



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado nº 808 - PPGEELT				
Data:	Um de setembro de dois mil e vinte e cinco	Hora de início:	14h00	Hora de encerramento:	16h05
Matrícula do Discente:	12222EEL003				
Nome do Discente:	Luis Antonio Vieira Vital				
Título do Trabalho:	Explorando a Banda Ultralarga (UWB) para Posicionamento e Transferência de Dados entre VANTs em Ambientes Cooperativos				
Área de concentração:	Sistemas de Energia Elétrica				
Linha de pesquisa:	Eletrônica Industrial, Sistemas e Controles Eletrônicos				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do Projeto: Daniel Costa Ramos. Título Do Projeto: RoboPatos: Divulgação e Comunicação Científica de Robótica em Patos de Minas. Instituição Parceira, se houver: Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais . Número do Processo na Instituição Parceira, se houver: APQ 02616-22 - Chamada FAPEMIG 05/2022. Vigência Do Projeto: 12/2022 a 11/2025.				

Reuniu-se através de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta:

Doutores: Aniel Silva de Moraes (UFU), Feres Azevedo Salem (Instituto SENAI de Inovação em Sistemas Embarcados) e Daniel Costa Ramos, orientador do discente.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof. Dr. Daniel Costa Ramos apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

APROVADO.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme, foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Costa Ramos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 01/09/2025, às 16:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Aniel Silva de Moraes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 01/09/2025, às 16:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Feres Azevedo Salem, Usuário Externo**, em 01/09/2025, às 16:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6586388** e o código CRC **89E4FD7C**.

Referência: Processo nº 23117.055477/2025-87

SEI nº 6586388

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao professor Daniel Costa Ramos, cuja orientação foi fundamental para o desenvolvimento desta dissertação, pela confiança depositada em meu trabalho e pelo apoio constante, sobretudo nos períodos mais desafiadores.

Agradeço também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento da bolsa de mestrado, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo suporte ao Projeto RoboPatos (APQ-02616-22).

RESUMO

O avanço da robótica moderna possibilitou a interação e a coordenação entre múltiplos robôs na realização conjunta de atividades complexas, como missões de exploração em ambientes desafiadores. Para que essa coexistência seja eficaz, dois requisitos fundamentais devem ser atendidos: a capacidade de localização dos robôs no ambiente e a troca eficiente de informações entre eles. Diversas tecnologias têm sido empregadas no gerenciamento dessa interação. Este trabalho propõe a aplicação da tecnologia de comunicação por banda ultralarga (UWB) em ambientes cooperativos com veículos aéreos não tripulados (VANTs), destacando seu potencial e robustez para integrar tarefas de localização precisa e troca de dados, eliminando a necessidade de tecnologias adicionais para esse fim. Isso minimiza custos e a complexidade dos sistemas. A metodologia envolveu a implementação de um sistema experimental em duas dimensões (2D) por meio de um veículo terrestre não tripulado (VTNT) e o método de localização Two-Way Ranging (TWR). A realização dos experimentos em um plano bidimensional permitiu a eliminação da complexidade associada às medições em três dimensões (3D). Foram avaliadas diferentes configurações de parâmetros e carga de dados, incluindo a transmissão simultânea de fragmentos de imagem durante as operações de localização.

Os resultados indicaram que o ajuste adequado dos parâmetros físicos e da carga de dados transmitida pode promover a integração eficiente entre as funcionalidades de localização e comunicação de dados, reforçando a viabilidade do uso da tecnologia UWB como uma solução unificada para aplicações cooperativas entre robôs móveis.

Palavras-chave: *ultra-wideband; UWB indoor localization; data communication; localização relativa; posicionamento.*

ABSTRACT

The advancement of modern robotics has enabled the interaction and coordination among multiple robots in the joint execution of complex tasks, such as exploration missions in challenging environments. For such coexistence to be effective, two fundamental requirements must be met: the ability of robots to localize themselves within the environment and the efficient exchange of information among them. Various technologies have been employed to manage this interaction. This work proposes the application of ultra-wideband (UWB) communication technology in cooperative environments involving unmanned aerial vehicles (UAVs), highlighting its potential and robustness in integrating precise localization and data exchange tasks, while eliminating the need for additional technologies, thus reducing system costs and complexity.

The methodology involved the implementation of a two-dimensional (2D) experimental system using an unmanned ground vehicle (UGV) and the Two-Way Ranging (TWR) localization method. Conducting the experiments in a bidimensional plane allowed for the elimination of the complexity associated with three-dimensional (3D) measurements. Different configurations of physical parameters and data payloads were evaluated, including the simultaneous transmission of image fragments during localization operations.

The results indicated that properly adjusting physical parameters and transmitted data load can promote efficient integration between localization and data communication functionalities, reinforcing the feasibility of using UWB technology as a unified solution for cooperative mobile robot applications.

Keywords: ultra-wideband; UWB indoor localization; data communication; relative localization; positioning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Espectro em UWB e tecnologias tradicional.	26
Figura 2 - Capacidade do canal de Shannon para $SNR=1$	28
Figura 3 – Estrutura de um <i>frame</i> UWB definido pela norma IEEE 802.15.4-2011.	28
Figura 4 - Estrutura de um símbolo de informação padrão IEEE 802.15.4.	30
Figura 5 - Esquema de modulação BPM-BPSK.....	30
Figura 6 - Módulo <i>Makerfabs</i> ESP32 UWB <i>Pro Display</i>	35
Figura 7 - Posicionamento RTLS baseado em UWB com 4 âncoras.	35
Figura 8 - Posicionamento baseado em ToA.....	39
Figura 9 - Posicionamento baseado em TDoA.	40
Figura 10 - Troca de mensagens entre <i>tag</i> e âncoras em DS-TWR.	42
Figura 11 - Posicionamento baseado em RSS.	43
Figura 12 - (a) Tag implantada na bola da NFL, (b) Tag implantada na bola da FIFA .	51
Figura 13 - Cenário experimental.	53
Figura 14 - Tela do Supervisorio.	55
Figura 15 - Geometria para projeção da distância da âncora A1 em plano bidimensional	56
Figura 16 - Representação geométrica do experimento.	56
Figura 17 - Representação dos vetores intermediários e de transmissão em um <i>frame</i> UWB com <i>payload</i> reduzido.	60
Figura 18 - Âncoras com suas antenas nativas integradas, posicionadas sobre suas hastes.	60
Figura 19 - Representação dos vetores intermediários e de transmissão em um <i>frame</i> com <i>payload</i> estendido.	62
Figura 20 - Setup experimental para <i>payload</i> estendido.	64
Figura 21 - ESP32-CAM a bordo do VTNT.	64
Figura 22 - Fluxo dos dados de vídeo da câmera para o supervisorio.	65
Figura 23 - Potência recebida pela tag em função da distância com uma âncora.	66
Figura 24 - Forma de onda das medições de distância com configuração básica e filtro desabilitado.	70
Figura 25 - Forma de onda das medições de distância com configuração básica e filtro habilitado.	71
Figura 26 - Forma da janela de tempo observada com configuração intermediária.....	71

Figura 27 - Forma da janela de tempo observada com configuração refinada.....	72
Figura 28 - Imagens capturadas pela câmera embarcada e transmitidas em UWB.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Artigos abordando localização e comunicação em UWB.	22
Tabela 3.1 - Principais características das técnicas de posicionamento.	44
Tabela 3.2 - Configurações usadas na pesquisa mencionada.	47
Tabela 4.1 - Estrutura do vetor intermediário para <i>payload</i> reduzido.	59
Tabela 4.2 - Estrutura do <i>buffer</i> intermediário de dados para <i>payload</i> estendido.	62
Tabela 5.1 - Parâmetros de configuração para o experimento.	67
Tabela 6.1 - Resultado do experimento com <i>payload</i> reduzido.	73
Tabela 6.2 - Resultado do experimento com <i>payload</i> estendido.	74

LISTA DE ABREVIATURAS

AoA	<i>Angle of Arrival</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
BPM	<i>Burst Position Modulation</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
DS-TWR	<i>Double-Sided Two-Way-Range</i>
FCC	<i>Federal Communication Commission</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
IPS	<i>Indoor Positioning System</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LOS	<i>Linha de visada</i>
NFL	<i>National Football League</i>
NLoS	<i>Non-Line of Sight (Fora da Linha de Visada)</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
RFIF	<i>Radio-Frequency Identification</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
RTLS	<i>Real-Time Locating System</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PRF	<i>Pulse Repetition Frequency</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SRAC	<i>Simultaneous Ranging and Communication</i>

TDoA	<i>Time Difference of Arrival</i>
ToA	<i>Time of Arrival</i>
ToF	<i>Time of Flight</i>
TWR	<i>Two-Way Range</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UWB	<i>Ultra Wideband</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VTNT	Veículo Terrestre Não Tripulado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	16
1.3	CONTRIBUIÇÕES	17
2	TRABALHOS RELACIONADOS	20
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
3.1	REGULAMENTAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA TRANSMISSÃO EM UWB.....	24
3.1.1	Capacidade do canal UWB.....	27
3.1.2	Estrutura do Quadro PHY UWB.....	28
3.1.3	Esquema de modulação.....	29
3.1.4	Segurança em UWB	31
3.2	AVANÇOS DA TECNOLOGIA UWB E CHIP DW1000.....	32
3.3	LOCALIZAÇÃO EM UWB	35
3.3.1	Time of Arrival (ToA)	38
3.3.2	Time-difference of Arrival (TDoA).....	39
3.3.3	Two-Way Ranging (TWR).....	41
3.3.4	Received Signal Strength Indicator (RSSI).....	43
3.4	LOCALIZAÇÃO E TRANSMISSÃO DE DADOS EM UWB	44
3.4.1	Rede de Ancoragem.....	45
3.4.2	Parâmetros da Camada Física	46
3.4.3	Estratégias do Algoritmo	47
3.5	ATRASO DA ANTENA EM TRANSMISSÕES EM UWB	48
3.5.1	Atraso de Grupo	48
3.5.2	Atraso pelo Ambiente.....	49
3.5.3	Calibração do Atraso da Antena.....	49
3.6	FUSÃO DE UWB COM OUTROS SENSORES	50
4	MATERIAIS E MÉTODOS	51
4.1	ESTRATÉGIAS DA PESQUISA	51

4.2	CENÁRIO E METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	52
4.2.1	Estratégia de rastreamento do VTNT	55
4.2.2	Estrutura de Dados Experimental	58
4.2.3	Operação com <i>Payload</i> Reduzido e Antenas Omnidirecionais.....	58
4.2.4	Operação com <i>Payload</i> Estendido e Antenas Direcionais.....	61
5	DESENVOLVIMENTO	66
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
6.1	EXPERIMENTO COM <i>PAYLOAD</i> REDUZIDO.....	69
6.2	EXPERIMENTO COM <i>PAYLOAD</i> ESTENDIDO.....	73
7	CONCLUSÃO	78
	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

A robótica cooperativa, com sua capacidade de atuação conjunta e coordenada entre múltiplos robôs, tem redefinindo a forma como concebemos a interação máquina-máquina. À medida que avançamos para cenários com alto nível de complexidade e refinamento, surge a necessidade de tecnologias igualmente avançadas capazes de prover recursos para atender as demandas mais desafiadoras em sistemas com restrição temporal rigorosa. Nesse contexto de aplicações estão os veículos aéreos não tripulados (VANTs), desempenhando importante papel na expansão das capacidades da robótica cooperativa em ambientes dinâmicos e complexos.

Em tais ambientes, o canal de comunicação deve ser capaz de prover alta taxa de transferência de dados entre os robôs que compartilham da mesma estratégia em uma tarefa comum. Além disso, deve garantir uma coordenação precisa de eventos e ações que precisam ocorrer simultaneamente ou em um padrão específico aceitável no tempo durante as tarefas de localização e posicionamento relativo entre os robôs.

A localização é um dos principais desafios na implantação de robôs móveis. As abordagens de localização podem ser divididas entre aquelas que fornecem localização global e as que focam na localização relativa (QUERALTA, 2022).

O primeiro grupo inclui principalmente os sensores baseados em Global Navigation Satellite System (GNSS). Essa tecnologia tem avançado rapidamente nos últimos anos, com o surgimento de diversos sistemas confiáveis como GPS, Beidou, GLONASS e Galileo. Entretanto, em ambientes complexos como cânions urbanos e regiões de transição entre áreas externas e internas, surgem os problemas de multipercurso e obstrução da linha de visada (LOS) (YAN; YANG; FAN; ZHENG *et al.*, 2024).

Além disso, muitos sistemas robóticos são implantados em ambientes internos ou sem linha de visada (NLoS), onde o GNSS é indisponível ou não fornece informações suficientemente precisas.

Nesse contexto emerge a segunda abordagem, aplicada à sistemas de posicionamento em ambientes internos, ou *Indoor Positioning System* (IPS). Diversas tecnologias de posicionamento e localização relativa têm sido utilizadas, como o infravermelho (CHENG; ZHOU, 2019), o *Light Detection and Ranging* (LiDAR) (ZHANG; DONG; LUO; LU *et al.*, 2022), o ultrassom (FAMILI; STAVROU; WANG;

PARK, 2023), a luz visível (ZHUANG; WANG; SHI; CAO *et al.*, 2019), a navegação inercial (KULIKOV, 2018) e a rádio frequência (SADOWSKI; SPACHOS, 2018).

Uma tecnologia emergente que tem se destacado nos últimos anos como solução robusta em ambientes onde o sinal do GNSS é falho ou indisponível, é a transmissão em banda ultralarga, *Ultra Wideband* (UWB) (SHULE; ALMANSA; QUERALTA; ZOU *et al.*, 2020). A implantação de vários transceptores UWB em cada robô permite não apenas a localização relativa entre cada par de robôs, mas também de orientação (SHULE; ALMANSA; QUERALTA; ZOU *et al.*, 2020).

Medições em UWB oferecem alta resolução espacial, com erro típico inferior a 10 centímetros e alcance máximo de até 50 m, sem mencionar a capacidade de comunicação dessa tecnologia. De acordo com (QUERALTA; ALMANSA; SCHIANO; FLOREANO *et al.*, 2020), os sistemas de localização baseados em UWB têm se apresentado como soluções de alta precisão, alcançando níveis de acurácia da ordem de dezenas de centímetros ou até mesmo centímetros.

UWB é uma tecnologia de comunicação sem fio de curta distância que utiliza pulsos de ondas de rádio de curta duração e largura de banda extremamente ampla, o que permite transmitir grandes volumes de dados a taxas extremamente elevadas. As sequências são codificadas através de chaveamento de mudança de fase binária (BPSK) e modulação de posição de burst (BPM) (IEEE, 2020)

Sistemas IPS baseados em UWB envolvendo VANTs tem atraído muita atenção em aplicações que requerem posicionamento preciso (LI; DUAN; LIANG; JIANG *et al.*, 2021; YANG; YANG; YU; LOELIGER, 2022), evidenciando os notáveis atributos dessa tecnologia, como alta precisão, baixa latência e robustez em ambientes desafiadores. Além disso, estratégias de fusão de sensores integram UWB com visão computacional (KAO; CHANG; TSENG; CHEN *et al.*, 2023; NGUYEN; NGUYEN; CAO; QIU *et al.*, 2019), sistema de navegação inercial (CHEN; XING; LI; WANG *et al.*, 2023; XU; SHMALIY; AHN; SHEN *et al.*, 2021), sistema magnético (BRUNACCI; ANGELIS, 2024) ou outras tecnologias de localização emergentes, constituindo abordagens de grande valor para investigações nesse domínio (CHUNXU; HENRY; TOBY, 2022; YANG; YANG, 2021).

Um outro aspecto igualmente importante em sistemas cooperativos e seus diversos cenários multiagentes é a capacidade de comunicação de dados, por onde os robôs possam trocar informações, aprender e compartilhar seu conhecimento com os demais envolvidos, abrindo assim um mundo de novas possibilidades.

Para esse propósito, a tecnologia UWB também pode oferecer valiosos recursos uma vez que oferece alta taxa de transferência de dados em função de sua alta largura de banda. Em (MANZI; FELIZIANI; BEECKMAN; DIJK, 2009), é sustentado que sistemas de comunicação via cabo baseados em USB serão futuramente substituídos por conexões sem fio UWB de curto alcance. Os autores justificam afirmando que UWB pode oferecer taxa de transferência superior à capacidade de uma porta USB 2.0, que entrega 480Mbps, permitindo assim aplicações como *streaming* de áudio, vídeo e comunicação entre *smartphones* e computadores pessoais.

Vantagens adicionais de UWB sobre outras tecnologias de comunicação sem fio envolvem alta eficiência energética, favorecendo o uso de baterias (ALARIFI; AL-SALMAN; ALSALEH; ALNAFESSAH *et al.*, 2016), alta tolerância a interferências de multipercurso (DROBCZYK; STROWIK; PHILPOT, 2017; XIANJIA; QINGQING; QUERALTA; HEIKKONEN *et al.*, 2021), e baixa probabilidade de interceptação desautorizada (BENGTSON; HEGGEN, 2005).

1.1 JUSTIFICATIVA

A crescente complexidade dos sistemas robóticos e a ampliação das aplicações em ambientes dinâmicos e cooperativos apontam para a necessidade de tecnologias de comunicação e localização que sejam simultaneamente precisas, eficientes e integradas. No contexto dos veículos aéreos não tripulados (Vants), essa demanda se intensifica, pois a operação em cenários com restrições temporais e espaciais rigorosas requer soluções tecnológicas robustas para garantir a coordenação e o desempenho eficaz das tarefas.

Embora tecnologias como GNSS, Wi-Fi e LiDAR tenham desempenhado papéis importantes na evolução da robótica cooperativa, suas limitações em ambientes internos ou em cenários sem linha de visada (NLoS) destacam a necessidade de abordagens alternativas. A comunicação em banda ultralarga (UWB) surge como uma solução promissora nesse cenário, oferecendo alta precisão no posicionamento, baixa latência e capacidade de transmissão de dados em alta taxa.

No entanto, apesar do reconhecido potencial do UWB, observa-se uma lacuna na literatura no que diz respeito à integração de suas capacidades de localização e comunicação em um único sistema. O desenvolvimento de uma abordagem que unifique essas funcionalidades não apenas minimizaria a complexidade arquitetônica dos sistemas,

mas também reduziria custos, consumo energético e a necessidade de tecnologias complementares.

Essa ideia pode ser exemplificada tomando o exemplo da pesquisa de (LIU; ZHANG; HE; LIN, 2022), que apresenta o desenvolvimento e implementação de um sistema de controle de voo em formação de VANTs utilizando a tecnologia UWB para posicionamento tridimensional. O mencionado trabalho poderia se beneficiar da integração de comunicação via UWB, eliminando o uso de um módulo Wi-fi (ESP12K) para transmissão de dados do VANT para o solo. Essa abordagem tornaria o sistema mais coeso, eficiente e robusto, o que é especialmente desejável em aplicações críticas como voo em formação autônoma.

Este trabalho justifica-se pela necessidade de investigar e validar experimentalmente o potencial da tecnologia UWB como uma solução integrada para localização e comunicação em ambientes cooperativos de VANTs. Busca-se simplificar as arquiteturas de sistemas robóticos, reduzindo a dependência de tecnologias complementares e otimizando o desempenho em cenários de alta complexidade, visando o desenvolvimento de sistemas mais eficientes, inteligentes e adaptados às demandas dos sistemas modernos.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral investigar e validar experimentalmente a aplicação da tecnologia de comunicação em banda ultralarga (UWB) como uma solução integrada para localização relativa e transferência de dados em ambientes cooperativos envolvendo veículos aéreos não tripulados (VANTs). Busca-se, por meio desta pesquisa, explorar o potencial de UWB para simplificar arquiteturas de sistemas robóticos, reduzindo a necessidade de tecnologias complementares e otimizando o desempenho em cenários de alta complexidade.

Além disso, pretende-se avaliar os benefícios operacionais, técnicos e econômicos dessa abordagem, promovendo avanços na interação coordenada e eficiente entre múltiplos robôs. Para alcançar o objetivo geral proposto, este trabalho se estrutura em torno dos seguintes objetivos específicos:

- Analisar as características técnicas de UWB através da investigação das propriedades de comunicação e localização da tecnologia UWB, com foco

em sua precisão, latência, eficiência energética e robustez em ambientes complexos .

- Desenvolver e implementar um sistema integrado de localização e comunicação em UWB capaz de realizar simultaneamente a localização relativa e a transferência de dados em um ambiente cooperativo.
- Avaliar o desempenho do sistema integrado por meio de testes experimentais para mensurar a precisão do posicionamento, a qualidade da comunicação e a eficiência geral do sistema em diferentes cenários operacionais, incluindo ambientes com condições NLoS presentes.
- Comparar o sistema UWB integrado com abordagens tradicionais avaliando fatores como custo, consumo energético, complexidade e desempenho operacional.
- Explorar a viabilidade em aplicações práticas, identificando e discutindo os possíveis casos de uso do sistema integrado em aplicações como inspeção industrial, monitoramento ambiental e operações de busca e salvamento, destacando os benefícios técnicos e econômicos.
- Propor melhorias e direções futuras com base nos resultados obtidos, identificando oportunidades para aprimorar a implementação de UWB em sistemas cooperativos, sugerindo ajustes técnicos e novas linhas de pesquisa.

1.3 CONTRIBUIÇÕES

Ao longo dessa pesquisa, grande diversidade de artigos que abordam localização/posicionamento via UWB foi identificada. Percebe-se, entretanto, que há na literatura uma escassez de estudos voltados para a análise da ação combinada entre localização/posicionamento e transmissão de dados, abordagem que dispensaria outras tecnologias de suporte à comunicação. Esta abordagem integrada parece ter relevância ainda não explorada, notadamente no contexto de VANTs. Ela pode dispensar o uso de tecnologias adicionais de suporte à comunicação entre robôs, otimizando a utilização de recursos, minimizando o consumo de energia, proporcionando uma solução mais compacta, econômica e de menor complexidade.

Assim, esse trabalho traz como contribuição a identificação dessa lacuna, cujo enfoque é aqui destacado pela convergência dessas duas facetas por meio da tecnologia

de banda ultralarga na direção de soluções integradas, otimizadas e eficientes no âmbito da robótica cooperativa. A pesquisa faz um apontamento chave por meio de uma análise da aplicação da tecnologia UWB em cenários cooperativos envolvendo VANTs sob o aspecto duplo de localização e transferência de dados.

Diferentemente das abordagens tradicionais, que adotam arquiteturas separadas para localização e troca de dados, o sistema proposto integra ambas as funções em uma única estrutura, promovendo maior eficiência e simplicidade na implementação.

Em trabalhos anteriores, já haviam sido exploradas as estratégias descritas por Vital e Ramos (2024), onde é feita uma análise da aplicabilidade da tecnologia UWB para localização relativa e comunicação em cenários cooperativos com VANTs, evidenciando o potencial de convergência entre posicionamento e transferência de dados.

Da mesma forma, Vital e Ramos (2025) apresentam uma implementação experimental utilizando veículos terrestres autônomos para simular o comportamento de VANTs, demonstrando a viabilidade de alcançar precisão centimétrica no rastreamento da posição do veículo, mesmo em condições de ausência de linha de visada (NLoS). Além disso, evidenciam a eficácia da transmissão de pacotes de dados de navegação da *tag* embarcada no veículo para um aplicativo supervisor, por meio de uma das âncoras do sistema UWB, validando assim a operação conjunta de localização e comunicação em tempo real.

A presente pesquisa avança nesse escopo ao implementar e validar um sistema UWB capaz de rastrear a posição do VANT, transmitir os dados de navegação, e simultaneamente transmitir dados de imagem capturados por uma câmera de vídeo a bordo. O trabalho se destaca pela convergência funcional, em tempo real, entre as capacidades de localização e comunicação de dados em maior volume, tudo em uma única estrutura operacional, compacta, de baixa latência e independente de Wi-Fi, reduzindo a complexidade típica de sistemas tradicionais.

Como resultado da pesquisa desenvolvida nesta dissertação, foram geradas publicações científicas que consolidam as contribuições obtidas. Essas publicações foram produzidas especificamente com base nos experimentos, análises e resultados aqui apresentados. São elas:

- VITAL, L. A. V.; RAMOS, D. C. (2024). *Aplicação de Comunicação UWB em Sistemas Cooperativos com Veículos Aéreos Não Tripulados*. IX Simpósio de Sistemas Autônomos Cooperativos (SSAC 2024), Uberlândia – MG, Brasil.

- VITAL, L. A. V.; RAMOS, D. C. (2025). *Integração de Localização e Transmissão de Dados via UWB em Robôs Móveis: Um Estudo Experimental*. XXVII Congresso Brasileiro de Robótica (CROS 2025), Belo Horizonte – MG, Brasil.

Essas publicações constituem contribuições relevantes no campo da robótica cooperativa e da comunicação por banda ultralarga, reforçando a originalidade e a aplicabilidade prática do sistema proposto nesta dissertação.

O trabalho está organizado da seguinte forma: a seção 2 discute os trabalhos relacionados, destacando abordagens anteriores e suas limitações; a seção 3 apresenta a fundamentação teórica necessária à compreensão dos conceitos aplicados; a seção 4 expõe os materiais utilizados e os métodos empregados na execução do experimento; a seção 5 detalha o desenvolvimento do sistema proposto; a seção 6 apresenta os resultados obtidos, acompanhados de suas respectivas análises e discussões. Por fim, a Seção 7 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

Os sistemas UWB emergem como uma das principais tecnologias para posicionamento crítico, sendo considerado uma das soluções mais adequadas em aplicações de medição de alcance e transferência de dados em anos. Impulsionada por vantagens expressivas em relação a outras tecnologias sem fio, UWB se destaca por oferecer, simultaneamente, localização relativa precisa e transferência de dados, eliminando a necessidade de tecnologias complementares para essas funções.

Essa dupla perspectiva em torno de UWB motivou pesquisadores cujas contribuições de seus trabalhos ajudam a sustentar a presente hipótese. Uma reflexão sobre a subutilização de UWB na medição de alcance combinada à transferência de dados é apresentada em (YU; LI; JORGE PEÑA; HEIKKONEN *et al.*, 2021). Os autores entendem que a incomparável capacidade de posicionamento de UWB é a principal razão por detrás da sua aceitação, mas seu potencial para atuar concomitantemente como canal de comunicação em rede permanece praticamente inexplorado. (YU; LI; JORGE PEÑA; HEIKKONEN *et al.*, 2021) defendem ainda que UWB oferece vantagens como menor latência, alta largura de banda e menor taxa de perda de pacotes em comparação com tecnologias como *Zigbee*, tornando-o uma tecnologia promissora para aplicações industriais emergentes onde um sistema sem fio é uma necessidade.

Outra observação da mesma pesquisa é que UWB está sendo explorado para redes *ad-hoc* e posicionamento em sistemas autônomos, o que destaca a versatilidade e o potencial de UWB não apenas para tarefas de localização, mas também para comunicação em ambientes industriais e robóticos

De acordo com (KABBINALE; BANSAL; GOPALAN, 2023), os recursos de UWB vão muito além da capacidade de medir distâncias, podendo também serem empregados na transferência de dados. (KABBINALE; BANSAL; GOPALAN, 2023) citam dois casos de uso: o primeiro é o sistema de pagamento sem contato, onde UWB permite combinar a capacidade de determinar com precisão a proximidade entre um dispositivo móvel e o dispositivo de pagamento, e a capacidade de comunicação de dados.

O segundo caso de uso explora a alta velocidade de transferência de dados de UWB combinada à medição de distância para determinar a localização relativa e orientação de um *headset* de realidade virtual e outros periféricos, fazendo então a transferência dessas informações entre as unidades sem a necessidade de tecnologias adicionais para isso.

Um método para localização e rastreamento de um alvo terrestre por um drone utilizando medições de posição e transferência de dados baseadas em UWB é proposto por (NGUYEN; ZAINI; WANG; GUO *et al.*). Tal método faz a fusão de dados obtidos por IMU, altímetro e fluxo óptico, utilizando um Filtro de Kalman Estendido capaz de estimar a posição relativa precisa e estável para o controle de voo. O sistema é adaptado para cenários de cooperação entre o VANT e um veículo terrestre não tripulado (VTNT), onde a capacidade de comunicação UWB é utilizada para transferir a orientação do alvo para o VANT. Os experimentos demonstram a capacidade do VANT de controlar sua posição em relação ao alvo de forma autônoma, independentemente de o VTNT estar parado ou em movimento com velocidade desconhecida, revelando a robustez do sistema UWB. O trabalho de (NGUYEN; ZAINI; WANG; GUO *et al.*, 2019) mostra que é possível executar as tarefas de posicionamento e transferência de dados sem a necessidade de uma tecnologia adicional para esse fim.

A capacidade de tráfego em UWB também foi explorada por (MOHAMMADMORADI; HEYDARIAAN; GNAWALI, 2019) ao desenvolverem uma nova técnica que foi denominada de *Simultaneous Ranging and Communication* (SRAC). Os autores destacam a importância de UWB para localização precisa em redes sem fio e propõe uma técnica que explora a capacidade de tráfego por meio de um algoritmo adaptativo para reduzir a sobrecarga na rede UWB.

O SRAC integra tarefas de medição de distância e comunicação otimizando o uso de sinais UWB tanto para estimativa de distância quanto para transferência de dados. O algoritmo é capaz de alternar dinamicamente entre modos de medição ativa e passiva com base nos requisitos de tráfego. Esse comportamento adaptativo do SRAC garante que as operações de medição de distância sejam otimizadas de acordo com as condições atuais da rede.

Um outro trabalho digno de nota é o de (SUN; HUANG; XIA; SHAO *et al.*, 2023), que aborda a importância da localização de pessoas e equipamentos em subestações subterrâneas, destacando as limitações de tecnologias tradicionais como Wi-Fi e RFID nesses ambientes. O autor propõe uma solução de design integrado de comunicação e localização baseada em UWB para superar tais desafios. O sistema proposto inclui estações base de comunicação UWB, tags de destino e um servidor local, com ênfase em redes *mesh* para facilitar o roteamento e a configuração de toda a rede.

O sistema de (MOHAMMADMORADI; HEYDARIAAN; GNAWALI, 2019) alcança uma precisão média de localização de 12 cm com economia de recursos, redução de custos e melhoria da eficiência do sistema em decorrência da integração de comunicação e localização na mesma estação base UWB.

As contribuições científicas identificadas neste estudo abordando o duplo aspecto de localização relativa e transferência de dados por meio de UWB estão resumidas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Artigos abordando localização e comunicação em UWB.

Referência	Conteúdo resumido
(SEDLACEK; SLANINA; MASEK, 2019)	Os autores entendem que as pesquisas sobre UWB trouxeram resultados muito precisos no que se refere à localização, mas o aspecto de comunicação não recebeu muito a atenção. Propõem uma técnica chamada Simultaneous Ranging and Communication (SRAC), que explora a capacidade de tráfego não utilizada para localização
(YU; LI; JORGE PEÑA; HEIKKONEN <i>et al.</i> , 2021)	Artigo de revisão que traz uma reflexão sobre a subutilização de UWB. Autores destacam que as capacidades de posicionamento incomparáveis do UWB são a principal razão da sua aceitação, mas o seu potencial para atuar simultaneamente na comunicação em rede permanece praticamente inexplorado.
(KABBINALE; BANSAL; GOPALAN, 2023)	Caso de uso 1: UWB gerenciando sistema de pagamento sem contato pela medição de distância e adicionalmente a transmissão dos dados. Caso de uso 2: Explora a transferência de dados combinada à medição de distância para determinar e transmitir a posição de headset VR.
(NGUYEN; ZAINI; WANG; GUO <i>et al.</i> , 2019)	Experimento com filtro de Kalman estendido para fusão de medições por UWB e sensor inercial (IMU). Uso da capacidade de comunicação UWB para enviar dados de orientação do alvo para o quadricóptero.
(MOHAMMAD MORADI; HEYDARIAAN; GNAWALI, 2019)	O autor propõe uma solução de design integrado de comunicação e localização em UWB para localizar pessoas e coisas em estações subterrâneas. O sistema alcança precisão média de localização de 12 cm e proporciona redução de recursos, custos e tem melhor eficiência

Fonte – Elaboração própria

A literatura analisada, de um modo geral, enfatiza o potencial da tecnologia UWB para aplicações de localização interna confiável, conforme sintetizam (DE COCK; TANGHE; JOSEPH; PLETS, 2023) ao destacarem a alta resolução temporal na medição de distâncias e a alta inclinação na borda de subida do sinal favorecendo uma detecção com precisão em nível centimétrico. Adicionalmente ao aspecto da medição precisa de distâncias, a literatura também aponta UWB como tecnologia com destacada capacidade de comunicação de dados devido à sua abundante largura de banda, a exemplo da pesquisa

de (MANZI; FELIZIANI; BEECKMAN; DIJK, 2009), que defende que os sistemas UWB substituirão conexões via cabo de barramento USB.

Entretanto, a presente pesquisa identificou uma lacuna quanto ao emprego de UWB nas operações de localização relativa e comunicação de dados em um mesmo protocolo UWB, sobre tudo na área da robótica cooperativa. A concepção central dessa abordagem visa reduzir a complexidade na arquitetura geral do sistema. Cada módulo adicional de hardware a bordo de um VANT aumenta o peso, o custo e o consumo de energia, além de sobrecarregar a estrutura do software embarcado e seus protocolos adicionais. Assim, parece haver uma notável viabilidade operacional, econômica, técnica, e de manutenção em empregar UWB como uma solução abrangente para localização e comunicação, eliminando a necessidade de sistemas complementares.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são apresentados os referenciais teóricos que sustentam o desenvolvimento desta dissertação. Inicialmente, será abordada a tecnologia de comunicação por banda ultralarga (UWB), com ênfase em suas características físicas, capacidade de transmissão de dados e potencial para localização em tempo real (RTLS).

Em seguida, são detalhados os fundamentos técnicos que tornam a UWB uma tecnologia promissora para aplicações em ambientes cooperativos, como a elevada resolução temporal, robustez frente a ambientes com multipercurso, baixa latência e eficiência energética.

São também descritas as principais abordagens para medição de distância e posicionamento em sistemas robóticos, com destaque para os métodos Time of Arrival (ToA), Time-Difference of Arrival (TDoA), Two-Way Ranging (TWR), Received Signal e Strength Indicator (RSSI).

Por fim, discute-se a viabilidade de integração entre localização relativa e comunicação de dados via UWB, ressaltando as vantagens operacionais, econômicas e técnicas dessa abordagem unificada no contexto de veículos aéreos não tripulados (VANTs).

3.1 REGULAMENTAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA TRANSMISSÃO EM UWB

Desenvolvida ainda na década de 1960, a comunicação em UWB permaneceu sem regulamentação por cerca de 40 anos, período em que seu uso foi estritamente militar. Diante do crescente interesse da indústria e universidades sobre essa tecnologia, impulsionado pelas suas notáveis vantagens, a agência responsável pela regulamentação das telecomunicações nos Estados Unidos, Federal Communication Commission (FCC), estabeleceu no ano de 2002 as regras sobre a emissão de sinais em UWB, o que permitiu sua padronização global marcando assim o início das aplicações comerciais. (KUMAR; PANDYA; MAKAVANA, 2015).

O FCC define UWB como um “tipo de sistema de transmissão sem fio de espectro espalhado que possui largura de banda fracionada instantânea de pelo menos 25% ou, alternativamente, 500 MHz ou mais”, devendo operar na faixa de 3.1-10.6 GHz para operações não militares. No ano de 2003 o regulamento foi alterado passando a incluir a faixa abaixo de 960 MHz. (BENGTSON; HEGGEN, 2005).

A regulamentação do FCC estabelece, para sistemas UWB em aplicações de comunicação interna, o limite de densidade espectral de potência de $-41,3$ dBm/MHz, considerando a utilização de toda a largura de banda de $7,5$ GHz, compreendida entre $3,1$ e $10,6$ GHz.(MANZI; FELIZIANI; BEECKMAN; DIJK, 2009), entretanto, é possível a transmissão em faixas de frequências como a de 60 GHz, onde os recursos espectrais não são restritos aos -41.3 dBm/MHz (MOLISCH, 2009). A largura de banda fracionada referida é uma métrica conveniente pra medições de sinais UWB, e é definida como:

$$B_f = 2 \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \quad (3.1)$$

onde f_H e f_L são a maior e menor frequência nos pontos de atenuação de 3 dB no sinal, respectivamente. O valor mínimo de 25% como estabelecido, é muito maior do que qualquer sistema de comunicação sem fio existente. Em função disso, os sistemas UWB atuais podem suportar taxas de transmissão de dados acima de 500 Mbps a um alcance de 10 metros (KUMAR; PANDYA; MAKAVANA, 2015).

As informações transmitidas em uma conexão UWB são controladas pela duração entre cada pulso e a localização desses em relação ao tempo. A largura de pulso da ordem de pico-segundos favorece a penetração através de obstáculos, fazendo de UWB um ótimo candidato para uso em ambientes onde as barreiras estão presentes e a detecção de objetos é necessária (SHULE; ALMANSA; QUERALTA; ZOU *et al.*, 2020). Suas características de penetração de objetos são muito superiores a outras tecnologias (JIA; GUO; LI; YU *et al.*, 2022).

No contexto das transmissões em banda ultralarga, os sinais são transmitidos com potência distribuída sobre uma faixa extremamente larga ao longo do seu espectro de frequências, onde cada canal assume pelo menos 500 MHz de largura de banda, possibilitando transmitir mais dados em determinado período de tempo que as tecnologias tradicionais sem fio (PAKISTAN, 2012)

Sistemas tradicionais em banda estreita modulam sinais dentro de uma frequência portadora específica para a transmissão de informações, assim, a concentração de energia na transmissão está bem definida, o que pode torná-la muito evidente e vulnerável a interceptação (SARKAR; SULTANA, 2018).

Os sistemas UWB se distinguem das tecnologias de comunicação convencionais por transmitirem sinais com densidade espectral de potência (PSD) extremamente baixa,

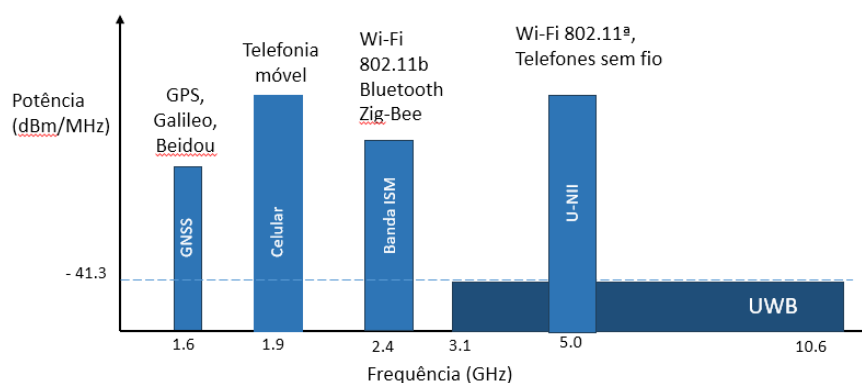
geralmente abaixo de $-41,3$ dBm/MHz, conforme regulamentado pela FCC. Essa característica permite que o sinal UWB opere com potência total reduzida, dispersa ao longo de uma largura de banda muito ampla (superior a 500 MHz), o que o torna praticamente indetectável por sistemas tradicionais e menos suscetível a interferência mútua.

Em comparação, sistemas de comunicação convencionais, como Wi-Fi e Bluetooth, concentram sua potência em faixas espectrais estreitas, com PSD significativamente mais elevada, tornando-os mais propensos à detecção, interferência e interceptação. Por operar com PSD próxima ou abaixo do nível de ruído térmico de fundo, o sinal UWB tende a ser interpretado como ruído pelas tecnologias legadas, o que favorece a sua discrição e a convivência harmônica com outras redes. A Figura 1 apresenta uma ilustração do espectro de UWB comparado aos sistemas tradicionais.

Diversos estudos sobre interferência em outros sistemas sem fio foram motivados pela preocupação decorrente da alta largura de banda de UWB. (MANZI; FELIZIANI; BEECKMAN; DIJK, 2009) apontam que, pelo fato de UWB ter seus sinais espalhados no espectro, seu nível de densidade espectral de potência (PSD) é baixo, o que faz com que UWB seja vista como uma tecnologia tolerante do ponto de vista da compatibilidade eletromagnética, não gerando interferência em outros sistemas sem fio, mas afirmam que alguns receptores como Wi-Fi posicionados fisicamente muito próximos de transmissores UWB podem ser afetados por interferência.

A esse mesmo respeito, (NGUYEN; NGUYEN; CAO; QIU *et al.*, 2019) avaliam que a baixa potência de transmissão permite que os nós operem por longos períodos sem manutenção, e causam muito pouca interferência em outros sinais sem fio operando na mesma área.

Figura 1 - Espectro em UWB e tecnologias tradicional.



Fonte: Elaboração Própria

Fonte: Modificado de (SARKAR; SULTANA, 2018)

O padrão IEEE 802.15.4-2011 estabelece 16 diferentes canais em UWB podendo ser configurados com 500 MHz de largura de banda (MOHAMMADMORADI; HEYDARIAAN; GNAWALI, 2018).

3.1.1 Capacidade do canal UWB

Além da reconhecida capacidade de gerenciamento em localização relativa e posicionamento precisos, a comunicação em UWB também se destaca pelo seu potencial em transferência de dados. Operando em largura de banda extremamente ampla, UWB permite taxas de transferência significativamente mais elevadas em comparação com tecnologias convencionais de curto alcance, possibilitando a transmissão de grandes volumes de dados.

Um conceito chave para o entendimento do notável potencial de UWB para comunicação de dados é a capacidade de um canal de comunicação, que representa a taxa teórica máxima na qual a informação pode ser transmitida de forma confiável através do canal. Assim, é de grande utilidade a investigação do teorema de Shannon, que relaciona a capacidade do canal de transmissão à sua largura de banda e relação sinal/ruído:

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (3.2)$$

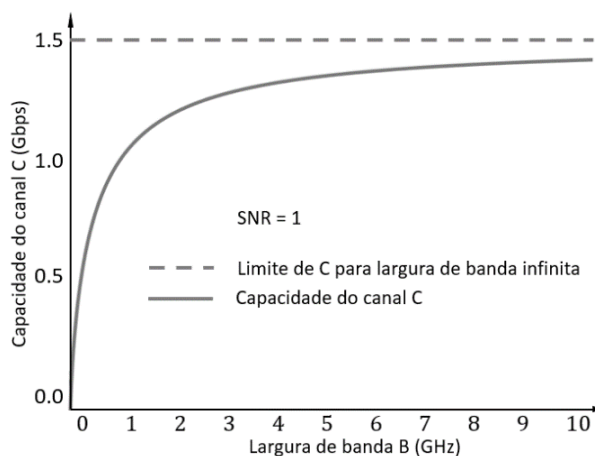
onde C é a capacidade do canal em bits/segundo, B é a largura de banda do canal em Hz, S é a potência do sinal e N é a potência do ruído.

A partir da equação 3.2 pode-se inferir que a capacidade de um canal de comunicação cresce linearmente com a largura de banda B, enquanto sua dependência da potência do sinal S é logarítmica. Como o canal UWB tem abundância de largura de banda, ele pode negociar parte dessa largura de banda contra potência de sinal reduzida e interferência de outras fontes, o que a torna uma tecnologia bastante atraente para aplicações que demandam comunicação robusta e de alta velocidade (PAKISTAN, 2012).

A relação sinal-ruído (SNR) também afeta a taxa máxima de transmissão que um canal de comunicação pode suportar. Aumentar a SNR ou a largura de banda pode garantir uma capacidade de canal maior, resultando em taxas de transmissão de dados mais atraentes. (SARKAR; SULTANA, 2018) alertam, entretanto, que a capacidade do canal não pode aumentar indefinidamente com a largura de banda uma vez que a potência do ruído tende a aumentar com larguras de banda mais amplas, limitando a capacidade de

transmissão de dados alcançável do canal. De fato, analisando a Figura 2, que representa o gráfico característico da equação de Shannon para uma relação sinal-ruído unitária, percebemos que a variável dependente C , que representa a capacidade do canal, tende a um valor limite quando a largura de banda tende ao infinito.

Figura 2 - Capacidade do canal de Shannon para $SNR=1$.

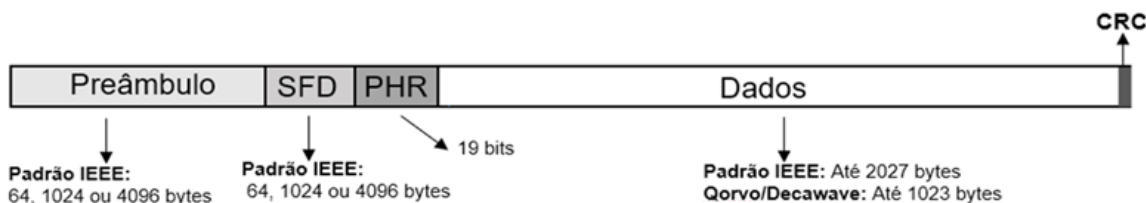


Fonte: Elaboração Própria

3.1.2 Estrutura do Quadro PHY UWB

Um quadro (*frame*) da camada física (PHY) do UWB, de acordo com a norma IEEE 802.15.4-2011, é dividido em quatro seções principais: o preâmbulo, composto por repetições que garantem a sincronização do receptor com o transmissor, o delimitador de início de quadro, que indica o fim do preâmbulo e o início das informações úteis, em seguida o cabeçalho PHY (PHR), codificado em 19 bits, que fornece informações essenciais como o comprimento do campo de dados, a taxa de transmissão e o tipo de codificação, e por fim a seção do *payload* de dados, que carrega as informações da aplicação e é finalizada com uma sequência de checagem de 2 *bytes* (CRC), que permite a detecção de erros no receptor. A Figura 3 apresenta a estrutura de um *frame* como definido pela norma.

Figura 3 – Estrutura de um *frame* UWB definido pela norma IEEE 802.15.4-2011.



Fonte: Adaptada de (DECAWAVE, 2017)

Essa estrutura organizada permite ao receptor detectar, sincronizar, interpretar e validar o conteúdo transmitido com alta confiabilidade. A Tabela 3.1 lista os parâmetros de *frame* UWB.

Tabela 3.1 - Parâmetros do *frame* PHY UWB.

Parâmetro	Descrição
Preâmbulo	Sequência repetitiva de símbolos que permite ao receptor sincronizar com o sinal transmitido.
SFD	Delimitador de início de quadro. Indica o fim do preâmbulo e o início das informações úteis.
PHR	Cabeçalho da camada física que informa o tamanho do <i>payload</i> e a taxa de dados utilizada.
<i>Payload</i> de dados + CRC	Conteúdo de dados a ser transmitido mais a sequência de 16 <i>bits</i> para verificação de integridade da recepção

Fonte: Elaboração própria

3.1.3 Esquema de modulação

Os símbolos da mensagem que compõe um *frame* em UWB, são modulados de forma particular para a transmissão. A norma estabelece um esquema com dois tipos de modulação. Uma usando a modulação de posição de *burst* (rajada), o BPM, outro usando chaveamento de mudança de fase binária (BPSK). Esses métodos não podem ser usados de forma isolada, mas de forma sequencial, onde o sinal de informação modula bits sistemáticos pela posição (da rajada) e adicionalmente pela fase (do sinal) para um canal redundante. (DECAWAVE, 2017)

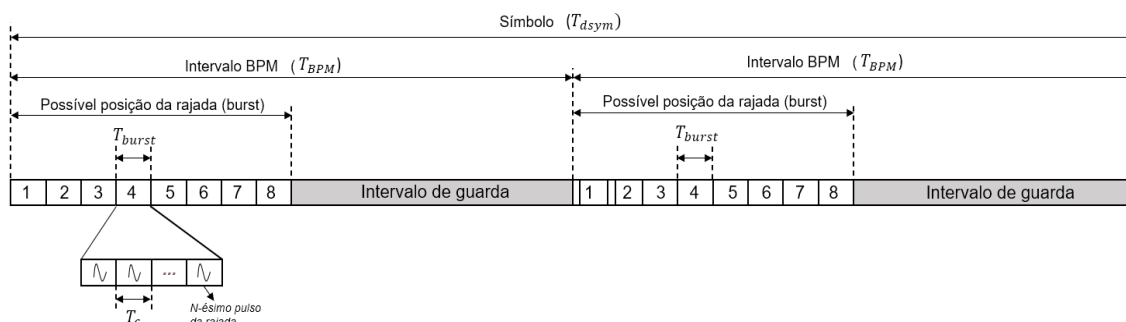
Ao modular o bit de informação em posição e em fase, o sistema de comunicação pode aproveitar as vantagens de ambas as técnicas, abordagem comumente utilizada para aumentar a robustez e a confiabilidade da transmissão em ambientes ruidosos (PASO; NIEMELÄ; HAAPOLA; HÄMÄLÄINEN *et al.*, 2015).

A documentação oficial do padrão apresenta informações relevantes de como um símbolo de informação é organizado dentro de um trem de pulsos a ser transmitido.

Conforme ilustra a Figura 4, o BPM divide um símbolo de informação em duas metades, definindo assim dois intervalos com duração $T_{BPM} = T_{dsym}/2$ cada. Cada intervalo é novamente dividido em duas metades, uma onde é possível ocorrer uma rajada em dada posição desse intervalo, e a outra uma banda de guarda que evita interferência de outros nós que também estão enviando dados. Uma rajada é formada por N_{cbp} pulsos

de comprimento T_c . Ela pode ser enviada na primeira ou segunda metade do símbolo, a informação sobre o bit transmitido é codificada pela posição da rajada dentro do símbolo.

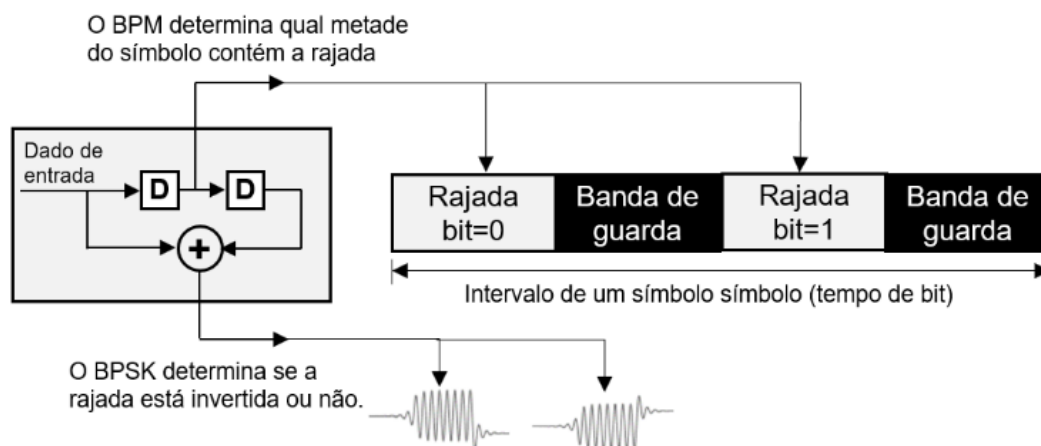
Figura 4 - Estrutura de um símbolo de informação padrão IEEE 802.15.4.



Fonte: Elaboração Própria

Além do BPM, o esquema emprega o BPSK na determinação da paridade do bit através da manipulação da fase do sinal da rajada (burst). Em termos simples, a fase da rajada, que é a portadora do sinal, é invertida para representar os diferentes bits, entre “0” e “1”. A Figura 5 apresenta o diagrama de um codificador BPM-BPSK. A saída superior corresponde ao BPM, que determina o bit pela posição da rajada. A saída inferior representa o BPSK, onde o bit é determinado pela fase da rajada.

Figura 5 - Esquema de modulação BPM-BPSK.



Fonte: Elaboração Própria

Essas modulações combinadas no esquema BPM-BPSK garantem uma transmissão de dados eficiente e confiável nos sistemas UWB.

3.1.4 Segurança em UWB

Sistemas UWB são frequentemente empregados em áreas sensíveis e aplicações críticas, como operações militares e de resgate, prevenção de colisões em veículos autônomos e mecanismos de autenticação para acesso seguro, como chaves digitais automotivas. Nesses cenários, eventuais falhas podem acarretar sérias consequências operacionais. Embora UWB enfrente desafios comuns às demais tecnologias de comunicação sem fio, como vulnerabilidades a ataques externos e riscos à privacidade, suas características inerentes conferem maior resiliência contra interceptação e escuta passiva. A ampla largura de banda, combinada à emissão de pulsos de curta duração e baixa potência, reduz consideravelmente a probabilidade de detecção e interceptação de sinais, tornando sua exploração maliciosa muito mais complexa. Para Drobczyk et al. (2017), a baixa densidade espectral de potência faz de UWB uma tecnologia resiliente contra escutas passivas (*eavesdropping*).

Contudo, pesquisadores alertam que em certos cenários essa proteção natural pode ser insuficiente. Ataques sofisticados podem transmitir sinais falsificados (*spoofing*) imitando uma fonte legítima em UWB com o objetivo de enganar dispositivos e manipular a rota e a posição, o que é particularmente perigoso em aplicações envolvendo veículos autônomos como VTNTs e VANTs.

Para aprimorar a segurança e confiabilidade dos sistemas UWB diante das ameaças de interceptação e *spoofing*, o padrão IEEE 802.15.4z incorporou diversas melhorias de segurança incluindo o suporte a mecanismos de autenticação e sincronização, como a sequência de carimbo de tempo embaralhada (STS). A técnica envolve a assinatura digital dos pacotes de sincronização e o uso de chaves criptográficas que são compartilhadas de protocolos seguros, garantindo que apenas dispositivos legítimos possam se comunicar de forma sincronizada e segura.

Diversas técnicas adicionais de segurança foram adotadas por pesquisadores, como a estratégia de salto temporal aleatório proposta em (GOU; YU; WU, 2024) e a técnica de espalhamento espectral de (RAHMAN; VENKATAKRISHNAN; VOLAKIS, 2023) para rejeição seletiva de interferências específicas por meio de correlação no receptor.

3.2 AVANÇOS DA TECNOLOGIA UWB E CHIP DW1000

O IEEE 802.15.4z é uma atualização do padrão IEEE 802.15.4 para redes sem fio de baixa taxa, que introduz melhorias significativas nas camadas físicas de UWB, nos métodos de medição de distância e na transmissão de pacotes de dados (SEDLACEK; SLANINA; MASEK, 2019). O aprimoramento do padrão tornou possível a ampliação do campo de comprimento do *payload*, anteriormente codificado com 7 bits na configuração padrão, para até 12 bits, permitindo assim o envio de pacotes consideravelmente maiores em uma única transmissão.

Essa atualização viabiliza um aumento significativo no comprimento máximo permitido para o *payload*, expandindo de 128 para 4096 *bytes* (CHUNXU; HENRY; TOBY, 2022; YANG; YANG, 2021). Uma outra melhoria na atualização do padrão é a ampliação no suporte à frequência de repetição de pulso (PRF). Na comunicação em UWB o bit de informação é enviado na forma de um trem de pulsos, em que a velocidade de envio pode ser configurada por um parâmetro básico chamado Frequência de Repetição de Pulso (PRF). Esse parâmetro define o intervalo entre o envio de dois pulsos consecutivos.

O aumento da PRF resulta em maior quantidade de pulsos sendo transmitidos em determinado intervalo de tempo, isso aumenta a quantidade de eventos de decisão de limiar, permitindo assim que o receptor UWB faça uma melhor avaliação do sinal recebido (SEDLACEK; SLANINA; MASEK, 2019). A evolução para o IEEE 802.15.4z elimina o suporte para PRFs de 4 e 16 MHz, e suporta valores mais altos de 128 e 256 MHz. Uma maior PRF aumenta a resolução temporal, e conseqüentemente a precisão na medição de distâncias.

Para (NGUYEN; NGUYEN; CAO; QIU *et al.*, 2019), medições em UWB são capazes de obter alta precisão, com erro de até 10 cm, e alcance máximo de até 50 m, sem mencionar sua capacidade de comunicação.

Todas essas características técnicas favoráveis dentro do contexto da comunicação de dados em banda ultralarga têm motivado pesquisadores a explorarem esse potencial. Pesquisas recentes realizadas sobre UWB trouxeram resultados muito precisos no que se refere à localização, mas o aspecto da comunicação de dados não recebeu muita atenção (MOHAMMADMORADI; HEYDARIAAN; GNAWALI, 2018). Os autores mencionam que aplicações que requerem localização e comunicação usam

peças separadas de hardware e software para cada uma dessas tarefas, como Wi-Fi e Bluetooth, o que aumenta a complexidade do sistema.

Em ambientes de colaboração multidrone, (YANG; LEE, 2023) defende que UWB é uma excelente alternativa na medição precisa de distâncias em cenários onde o GNSS pode ser falho, e ressalta a importância dessa tecnologia em permitir trocas adicionais de informações em canais secundários. Os autores realizaram simulações e um experimento prático envolvendo 4 drones em voo de formação. O resultado demonstrou a aplicabilidade e eficácia do sistema UWB em um ambiente real.

Em (BONCI; CAIZER; GIANNINI; GIUGGIOLONI *et al.*, 2023) há uma discussão sobre o potencial de UWB para a implementação de casos de uso na indústria 4.0. O trabalho salienta que, embora as aplicações de UWB sejam amplamente utilizadas em sistemas de comunicação, radar e sistemas de posicionamento, poucos trabalhos se concentraram em aplicações industriais.

O experimento prático realizado envolveu a implementação de uma rede de sensores UWB para monitoramento de vibrações de máquinas para a extração em tempo real de características diagnósticas e prognósticas por sinais de alta frequência. Testes preliminares apresentaram resultados que incluem a transmissão de dados de acelerômetro a taxas de até 6,8 Mbit/s, com taxa de perda de pacotes máxima de apenas 2,44%. Conclui-se que UWB pode ser aplicado em monitoramento de ambientes industriais reais e gerar notificações em tempo real sobre anomalias.

Transmissões em UWB ganharam grande destaque nos últimos anos por permitirem medições de distância com alta precisão, baixa latência e capacidade adicional de transmissão de dados, sendo particularmente útil em aplicações em sistemas RTLS. Um dos chips comerciais mais utilizados para essa finalidade é o descrito em (DECAWAVE, 2017), originalmente fabricado pela Decawave, atualmente pertencente à Qorvo.

Trata-se de um transceptor UWB que opera de 3,5 GHz a 6,5 GHz, compatível com a norma IEEE 802.15.4-2011 permitindo PRF de 16 MHz ou 64 MHz. Quando configurado na topologia âncora-tag, ele é capaz de realizar medições de tempo de voo (ToF) com precisão inferior a 10 cm utilizando técnicas de two-way ranging (TWR) ou time difference of arrival (TDoA), permitindo ainda a transmissão de *payload* de dados customizados de até 1023 *bytes*.

Embora o DW1000 seja amplamente utilizado em sistemas de localização, o chip também pode operar exclusivamente como transmissor e receptor de dados em aplicações voltadas à comunicação massiva. Nessa configuração, o foco deixa de ser a medição de distância e passa a ser a transmissão eficiente de pacotes de dados com alta confiabilidade e baixa latência, aproveitando as características do UWB, como a elevada taxa de dados (até 6,8 Mbps), a resistência a interferências e a baixa probabilidade de colisão entre transmissões.

Dessa forma, o DW1000 pode ser empregado em aplicações como redes de sensores de alta densidade que combinam localização e comunicação simultânea, o que demonstra a grande flexibilidade dessa tecnologia. A Tabela 3.2 apresenta as taxas de transmissão e parâmetros técnicos do DW1000.

Atualmente, diversos fabricantes integram o DW1000 em módulos comerciais, um exemplo é o *Makerfabs ESP32 UWB Pro Display* (Makerfabs, 2023), mostrado na Figura 6, que combina o DW1000 com um microcontrolador ESP32, além de um *display* OLED e conector *USB-C* para alimentação e programação.

Tabela 3.2 - Taxas de transmissão e parâmetros técnicos do DW1000.

Parâmetro	Valor / Descrição
Taxa de Dados: 110 kbps	PRF: 16 ou 64 MHz; Sensibilidade: -110 dBm; Duração: ~2 ms (128 bytes); TX: ~30 mA; Alta robustez, maior alcance, mais lento
Taxa de Dados: 850 kbps	PRF: 16 ou 64 MHz; Sensibilidade: -100 dBm; Duração: ~0.3 ms (128 bytes); TX: ~45 mA; Compromisso entre robustez e velocidade
Taxa de Dados: 6.8 Mbps	PRF: 64 MHz; Sensibilidade: -93 dBm; Duração: ~0.05 ms (128 bytes); TX: ~85 mA; Baixa latência, maior taxa, menor alcance
Tamanho máximo do <i>frame</i>	Até 1023 bytes com <i>frame</i> estendido (Extended PHR)
Modulação	BPSK para 110/850 kbps; BPSK com BPM para 6.8 Mbps
Códigos de preâmbulo	De 64 a 4096 símbolos
Canais UWB suportados	Canais 1, 2, 3, 4, 5, 7
Largura de banda	Típica de 500 MHz por canal
Precisão de ranging	Até ±10 cm, com calibração
Velocidade SPI recomendada	Até 20 MHz (modo rápido)
Técnicas de sincronização	Opcional (para TDoA); não necessária no modo TWR
Consumo em recepção (RX)	~60 mA
Consumo em modo SLEEP	< 1 µA

Fonte – <https://www.qorvo.com/products/p/DW1000>. Acesso em: jan. 2024.

Figura 6 – Módulo *Makerfabs ESP32 UWB Pro Display*.



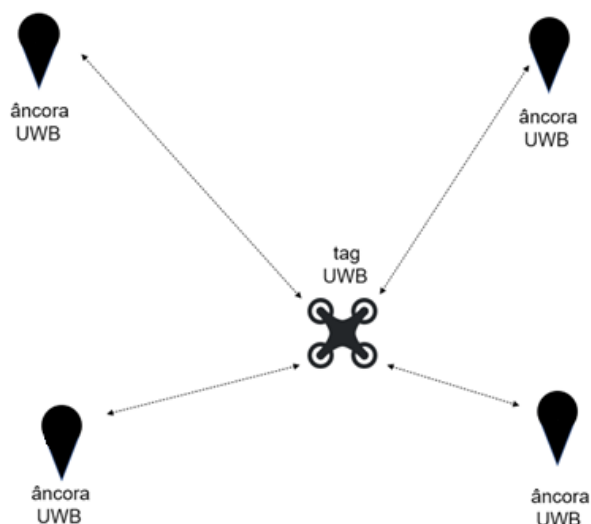
Fonte: <https://how2electronics.com/>

3.3 LOCALIZAÇÃO EM UWB

Um sistema de localização em tempo real (RTLS) deve atender à capacidade de localização e rastreamento em tempo real de objetos ou pessoas em uma área limitada. A ideia baseia-se na utilização de duas classes de dispositivos: as âncoras, que são nós fixos em posição estacionária conhecida que atuam como referência para a localização das *tags*, ou etiquetas, que são os dispositivos a serem localizados e rastreados (ALARIFI; ALSALMAN; ALSALEH; ALNAFESSAH *et al.*, 2016).

A Figura 7 ilustra o princípio de funcionamento de um sistema de localização em tempo real (RTLS) baseado na tecnologia UWB, no qual uma *tag* móvel é localizada por meio da medição das distâncias em relação a quatro âncoras fixas posicionadas no ambiente, conforme comumente empregado em aplicações descritas na literatura.

Figura 7 - Posicionamento RTLS baseado em UWB com 4 âncoras.



Fonte: Elaboração Própria

Dentre as tecnologias de comunicação sem fio capazes de fornecer localização e rastreamento em tempo real, UWB destaca-se com grande potencial pra cumprir seus requisitos (YANG; YANG, 2021). A ampla faixa no espectro de frequência quando comparado com tecnologias como GPS, Wi-Fi, Bluetooth e RFID, permite a comunicação por meio de pulsos ultra curtos, o que garante maior precisão na medição, tornando o mais adequado para aplicações que exigem alta precisão e exatidão (CHOI; LA; LEE, 2018). Diferentemente da transmissão em banda estreita, UWB como impulso de rádio pode transmitir um sinal com tempo de duração extremamente curto, na escala de nanossegundos. Vantagens dessa característica incluem baixa potência média de transmissão, grande capacidade de canal, transceptores UWB simplificados e alta resolução no domínio do tempo (HE; WU; HAN, 2024).

Para (GNAŚ; ADAMKIEWICZ, 2022), a tecnologia UWB é a melhor solução aplicada ao problema de localização interna com cálculo baseado no tempo de resposta do transmissor. Com UWB também é possível calcular a posição com base no indicador de força do sinal recebido (RSSI).

Ambientes complexos com obstáculos no caminho do sinal ou estruturas metálicas ao redor, se tornam desafios por afetarem diretamente a propagação do sinal de RF. Reflexões geram duplicidade da onda causando interferências multipercurso degradando a qualidade do sinal. As transmissões em UWB têm a vantagem de robustez e alta imunidade ao desvanecimento de sinal causado por multipercurso (PASTRAV; SIMEDRONI; PALADE; DOLEA *et al.*). Durante o processo de recepção por uma âncora, o primeiro caminho pode ser identificado pelo algoritmo de detecção da borda principal do sinal, incorporado no chip UWB.

Sistemas de localização baseados UWB utilizam âncoras para efetuar medições de alcance entre nós fixos e os nós móveis, ou *tags*. A distância entre um nó que transmite o sinal e seu receptor pode ser estimada de forma consistente com base no tempo de voo do sinal utilizando a velocidade de propagação dos pulsos, que é conhecida.

Diversos estudos foram empreendidos na investigação sobre a transmissão em UWB em ambiente complexo, como exemplo a apresentada por (ZIKRUL HAKIEM; SALLEHUDDIN MOHAMED, 2023), que envolveu um experimento integrando UWB e uma unidade de sensor inercial (IMU) em um ambiente contendo vários móveis como obstáculos. A pesquisa concluiu que, ao aplicar ajustes finos (*fine-tuning*) nos parâmetros de configuração de UWB, foi possível alcançar maior precisão e menor erro relativo, obtendo acurácia entre 0,15 mm e 115 mm, mesmo em presença de obstáculos.

No aspecto da linha de visada entre transmissor e receptor, (HAYWARD; VAN LOPIK; HINDE; WEST, 2022) apresentam um estudo resultado da aplicação de técnicas para extrair informações de localização interna por meio de tecnologias como Wi-Fi, Bluetooth, ultrassom e UWB em condições de NLoS. Segundo o autor, o estudo pretende servir de referência para a seleção de tecnologias para sistemas futuros com base nos requisitos. No comparativo entre as tecnologias empregadas, (JIA; GUO; LI; YU *et al.*, 2022) concluíram que UWB é mais adequado onde condições de NLoS estão presentes, tendo ainda um benefício adicional de transmissão de dados.

No entendimento de (DE COCK; TANGHE; JOSEPH; PLETS, 2023), entretanto, sistemas de posicionamento interno baseados em UWB degrada-se significativamente em condições NLoS, sendo a detecção e mitigação dessas condições um problema complexo. Ainda assim, (NGUYEN; NGUYEN; CAO; QIU *et al.*, 2019) avaliam UWB como um candidato quase ideal para qualquer sistema de posicionamento interno.

A alta resolução na temporização do sinal permite maior precisão na medição de distâncias (*ranging*). Devido à borda de subida do sinal ser muito inclinada, o receptor pode determinar com alta precisão o momento de chegada do sinal, permitindo uma precisão em nível centimétrico (COPPENS; SHAHID; LEMEY; HERBRUGGEN *et al.*, 2022).

Isso favorece à observação de (SUN; XIE; XIONG; ZHANG *et al.*, 2022) quando destacam que um pré-requisito para um robô móvel concluir sua tarefa com sucesso é obter dados de navegação relativamente confiáveis, como posição coordenada, ângulo de postura e velocidade.

O crescimento exponencial das aplicações em ambientes internos, especialmente nas áreas de automação industrial, robótica cooperativa e logística, tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias capazes de fornecer posicionamento em tempo real com alta precisão. A localização precisa de objetos, robôs e pessoas é um requisito essencial para a eficiência e segurança em ambientes dinâmicos, onde a simples disponibilidade de posicionamento global via GNSS é insuficiente ou impraticável.

Em cenários fechados ou complexos — como fábricas, armazéns, subestações e ambientes urbanos densos — as tecnologias tradicionais enfrentam sérias limitações causadas por reflexões, interferências, obstruções físicas e ausência de linha de visada direta (LoS). Neste contexto, surge a necessidade de soluções alternativas que garantam

não apenas a robustez contra multipercurso e ambientes não estruturados, mas também uma baixa latência e elevada acurácia espacial.

A tecnologia de comunicação em banda ultralarga (UWB) tem se consolidado como uma das principais candidatas para atender a esses requisitos, especialmente em sistemas de localização relativa de alta resolução. Utilizando pulsos de curta duração e largura de banda extremamente ampla, UWB oferece medições de tempo de voo (ToF) com precisão na ordem de centímetros, além de suportar mecanismos avançados de modulação e sincronização que favorecem a confiabilidade do sistema mesmo sob condições adversas.

Diante desse cenário, diversos métodos de localização relativa vêm sendo propostos e aplicados, cada um com suas características específicas, requisitos e aplicações ideais. A seguir, são apresentados os principais métodos de medição de distância e localização utilizados em sistemas RTLS, com destaque para suas vantagens e limitações.

Alguns métodos de localização relativa utilizando redes de ancoragem foram desenvolvidos e podem ser classificados nas categorias a seguir:

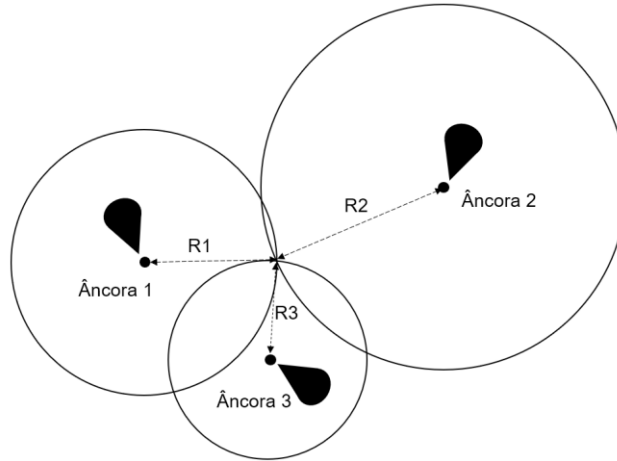
- *Time of Arrival* (ToA) (LIU; ZHANG; CAO, 2021)
- *Time-difference of Arrival* (TDoA) (ZHOU; CHENG, 2021)
- *Two-Way Ranging* (TWR) (YANG; YANG; YU; LOELIGER, 2022)
- *Angle of Arrival* (AoA) (HEYDARIAAN; DABIRIAN; GNAWALI, 2020)
- *Received Signal Strength* (RSSI) (SADOWSKI; SPACHOS, 2018)

3.3.1 Time of Arrival (ToA)

Também conhecido como *Time of Flight*, calcula a distância entre *tag* e âncora por meio da medição do tempo de propagação entre esses dois nós e a constante de velocidade de propagação do sinal.

O ToA mede o tempo de voo enviando sinais entre âncoras e tags, então a distância pode ser calculada com um algoritmo de trilateração para a determinação da posição em relação às âncoras. O algoritmo exige uma sincronização rigorosa dos relógios entre todos os nós sensores, o que pode ser uma tarefa desafiadora na prática. Um desvio do relógio pode facilmente afetar o desempenho de posicionamento, principalmente se a *tag* se move rapidamente (WU, 2022). A Figura 8 ilustra o posicionamento baseado em ToA.

Figura 8 - Posicionamento baseado em ToA.



Fonte: Elaboração Própria

Onde (x_1, y_1) , (x_2, y_2) e (x_3, y_3) são as coordenadas das âncoras 1, 2 e 3, respectivamente, e (x, y) são as coordenadas da *tag*. As distâncias entre R1, R2 e R3 entre a *tag* as âncoras são determinadas como:

$$R_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (3.3)$$

$$R_2 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} \quad (3.4)$$

$$R_3 = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} \quad (3.5)$$

(ZIKRUL HAKIEM; SALLEHUDDIN MOHAMED, 2023) ressaltam que ambientes complexos onde os sinais se propagam por múltiplos caminhos, diversas cópias do sinal podem estar presentes e incidirem no receptor em tempos ligeiramente diferentes, gerando erros. Para lidar com esse desafio, os autores sugerem uma abordagem mais sofisticada de detecção, que utilize “informações suaves” em vez de uma decisão binária sobre um limite fixo.

3.3.2 Time-difference of Arrival (TDoA)

Mede a diferença do tempo de propagação do sinal entre uma *tag* e duas âncoras receptoras quaisquer e calcula a diferença de distância entre os dois caminhos (LOU; ZHAO, 2019). É também conhecido como posicionamento hiperbólico. Considerando uma rede TDoA com quatro âncoras e uma *tag*, a diferença do tempo de voo do sinal medido entre a *i*-ésima âncora e a *j*-ésima âncora, denotada por t_{ij} , pode ser convertida para a diferença de distância d_{ij} multiplicando-a pela velocidade da luz, porque d_{ij} pode

ser obtido de $d_{ik} - d_{jk}$, qualquer âncora pode ser escolhida como âncora de referência. (HUANG; CHEN; WEI; TSAI *et al.*, 2023)

Pelo fato de não depender da distância entre *tag* e âncora, o TDoA apenas requer sincronicidade entre âncoras, uma vez que o cálculo é baseado na diferença de tempo/distância (BRENA; GARCÍA-VÁZQUEZ; GALVÁN-TEJADA; MUÑOZ-RODRIGUEZ *et al.*, 2017).

A principal diferença entre o ToA e o TDoA é que para o ToA, ambas as partes envolvidas na transação *tag*/âncora devem ter sincronismo perfeito de relógio para obter precisão.

O TDoA não utiliza diretamente a diferença entre o tempo de emissão e chegada do sinal, mas a diferença de tempo entre os sinais recebidos por múltiplas âncoras UWB para calcular a posição de uma etiqueta UWB em movimento (CHENG; ZHOU, 2019). Assim, para o posicionamento TDoA, as partes envolvidas não precisam estar sincronizadas, mas a medição requer que as âncoras estejam (SHEN, 2022). A Figura 9 ilustra um possível cenário de aplicação da técnica.

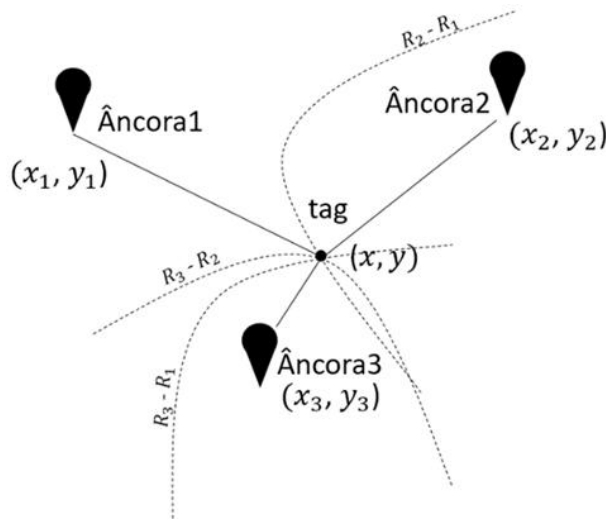
Onde (x_1, y_1) , (x_2, y_2) e (x_3, y_3) são as coordenadas das âncoras 1, 2 e 3, respectivamente, (x, y) são as coordenadas da *tag*, R_1 , R_2 e R_3 são as distâncias da *tag* para as âncoras 1, 2 e 3, respectivamente:

$$R_2 - R_1 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (3.6)$$

$$R_3 - R_2 = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} \quad (3.7)$$

$$R_3 - R_1 = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (3.8)$$

Figura 9 - Posicionamento baseado em TDoA.



Fonte: Elaboração Própria

3.3.3 Two-Way Ranging (TWR)

O TWR, também conhecido como Two-Way Time-of-flight (TW-ToF), faz o registro do momento em que uma mensagem é enviada, o Time-of-Departure (TOD), e do momento em que a mensagem é recebida, Time-of-Arrival (ToA). A diferença de relógios pode ser teoricamente subtraída a partir do ToA e ToD de ambos os lados, evitando a exigência de sincronismo de relógios entre os nós do sistema. Como resultado, diversas pesquisas nos últimos anos têm focado em soluções de posicionamento de VANTs em ambientes internos baseadas em TWR (LAZZARI; BUFFI; NEPA; LAZZARI, 2017). De acordo com (GAO; JIAO; YANG; LI *et al.*, 2023), o TWR permite a medição precisa da distância entre dispositivos UWB sem a necessidade de sincronização de relógios, utilizando a troca bidirecional de mensagens para calcular o tempo de voo. Os autores demonstraram a alta precisão de localização em ambientes internos, mesmo na presença de interferências NLoS (Non-Line-of-Sight), alcançando erros médios de localização inferiores a 10 cm. Para (DEWBERRY; PETROFF, 2015), em ambientes confinados, onde a implantação de múltiplos nós âncora é limitada, o método TWR se mostra eficaz, pois requer menos infraestrutura e ainda assim proporciona alta precisão de localização.

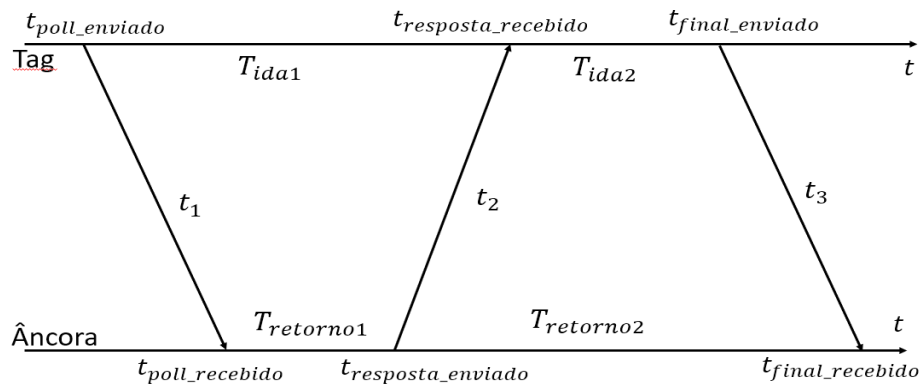
No esquema TWR, a *tag* envia uma mensagem de requisição (*poll*) para múltiplas âncoras fixas. Cada âncora registra o carimbo de tempo (*timestamp*) de recepção e responde com uma mensagem (*response*) contendo seu próprio *timestamp* de envio. A *tag* então recebe a resposta e registra o tempo de chegada. Assim, a distância entre a *tag* e cada âncora pode ser estimada com base nas diferenças desses tempos. Em uma versão estendida do método, conhecida como *Double-Side Two-Way Ranging* (DS-TWR), a *tag* envia uma terceira mensagem (*final*) para que a âncora também possa calcular a distância com alta precisão, compensando diferenças de *clock* entre os dispositivos. A Figura 10 apresenta graficamente a troca de mensagens do esquema DS-TWR.

$$T_{ida1} = t_{resposta_recebido} - t_{poll_enviado} \quad (3.9)$$

$$T_{retorno1} = t_{resposta_enviado} - t_{poll_recebido} \quad (3.10)$$

$$T_{ida2} = t_{final_recebido} - t_{resposta_enviado} \quad (3.11)$$

$$T_{retorno2} = t_{final_enviado} - t_{resposta_recebido} \quad (3.12)$$

Figura 10 - Troca de mensagens entre *tag* e âncoras em DS-TWR.

Fonte: Elaboração Própria

Dentre os principais *timestamps* estão: o instante de transmissão da mensagem de requisição ($t_{poll_enviado}$), o instante de recepção dessa mensagem pela âncora ($t_{poll_recebido}$), o instante de transmissão da resposta pela âncora ($t_{resposta_enviado}$), o instante de recepção da resposta pela tag ($t_{resposta_recebido}$), além de instantes adicionais, como $t_{final_enviado}$ e $t_{final_recebido}$, quando o protocolo utilizado adota a versão DS-TWR. A Tabela 3.3 apresenta o caminho e conteúdo da mensagem em DS-TWR.

Além dos *timestamps*, o vetor de dados também abriga informações auxiliares, incluindo identificadores de pacote, contadores de sequência, indicadores de qualidade do sinal, nível de potência recebida (*Rx Power*), e parâmetros internos de calibração da antena e do canal.

Tabela 3.3 - Caminho e conteúdo da mensagem em DS-TWR.

Mensagem	Origem→Destino	Timestamp	Conteúdo	Função principal
poll	Tag → Âncora	PollTx ($t_{poll_enviado}$)	Marca o envio do poll	Inicia o ciclo de medição
poll	Tag → Âncora	PollRx (na âncora) ($t_{poll_recebido}$)	Marca o recebimento do poll	Referência para tempo de resposta
resposta	Âncora → Tag	RespTx $t_{resposta_enviado}$	Marca o envio da resposta	Continuação da troca de mensagens
resposta	Âncora → Tag	RespRx (na tag) $t_{resposta_recebido}$	Marca o recebimento da resposta	Permite calcular tempo de ida
final	Tag → Âncora	FinalTx $t_{final_enviado}$	Marca o envio da mensagem final	Fornecer os tempos t_1 , t_2 e t_3 para a âncora
final	Tag → Âncora	FinalRx (na âncora) $t_{final_recebido}$	Marca o recebimento da mensagem final	Âncora calcula o tempo de voo

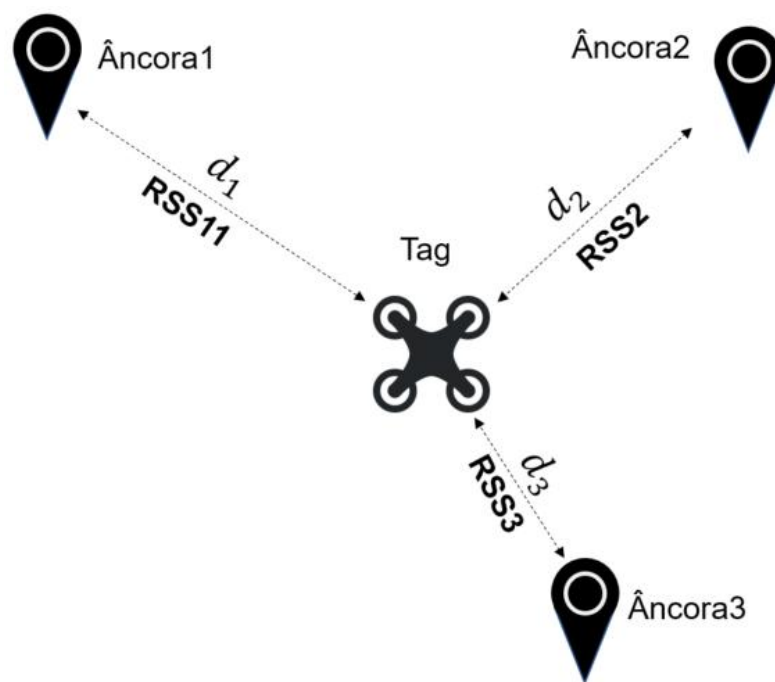
Fonte: Elaboração Própria

3.3.4 Received Signal Strength Indicator (RSSI)

Calcula a distância entre uma *tag* e diversas âncoras medindo a potência dos sinais recebidos e aplicando um modelo de propagação apropriado para o ambiente. O cálculo é baseado na potência recebida e na relação entre a atenuação do sinal e a distância percorrida. Como a potência transmitida é conhecida, é possível calcular sua atenuação (BIBBÒ; CAROTENUTO; DELLA CORTE, 2022).

De fato, uma vez que a atenuação do sinal é diretamente proporcional à distância percorrida, com o uso de valores teóricos e modelos empíricos baseados na lei de propagação do sinal, é possível derivar a distância (AL-BAWRI; ISLAM; SINGH; JAMLOS *et al.*, 2022). Entretanto, vários fatores podem afetar a precisão do método. Interferência e reflexão do sinal podem causar variações na intensidade do sinal recebido, e estimativas com base apenas no RSSI podem não ser precisas. A Figura 11 ilustra um possível cenário para aplicação da técnica.

Figura 11 - Posicionamento baseado em RSS.



Fonte: Elaboração Própria

As principais características das técnicas apresentadas podem ser resumidas conforme a Tabela 3.2, que também mostra um comparativo entre elas.

Tabela 3.1 - Principais características das técnicas de posicionamento.

Técnica	Precisão	Vantagens	Desvantagens
ToA	Alta	<ul style="list-style-type: none"> - Alta precisão e escalabilidade. - Não requer fingerprint do ambiente. - Aplicável em sistemas de localização em larga escala. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requer sincronização precisa entre dispositivos. - Difícil de implementar devido à alta sensibilidade temporal. - Sofre com efeitos de propagação multipercurso.
TDoA	aoaAlta	<ul style="list-style-type: none"> - Não requer sincronização entre tags e âncoras. - Escalável para múltiplas tags. - Menor impacto de variabilidade de hardware em tags. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requer sincronização precisa de todas as âncoras. - Depende de infraestrutura de rede robusta para manter a sincronização.
TWR	Alta	<ul style="list-style-type: none"> - Não exige sincronização de relógios - Menor complexidade e o custo da rede. - Robustez em ambientes internos e confinados - Suporte nativo por chips comerciais 	<ul style="list-style-type: none"> - Latência mais alta resultando em menor frequência de atualização.
RSSI	Baixa	<ul style="list-style-type: none"> - Fácil de implementar. - Baixo custo de hardware. - Não exige requisitos rigorosos de sincronização temporal. 	<ul style="list-style-type: none"> - Muito vulnerável a interferência multipercurso. - Baixa precisão em ambientes NLoS e com alta densidade de obstáculos. - Alta dependência de condições ambientais.

Fonte: Elaboração Própria

3.4 LOCALIZAÇÃO E TRANSMISSÃO DE DADOS EM UWB

Essa capacidade de integração das funcionalidades de medição de distância e transmissão de dados customizados representa uma abordagem atraente da tecnologia em UWB frente às soluções tradicionais que segmentam essas funções entre diferentes tecnologias, como a combinação de *Wi-Fi*, *Bluetooth* ou *ZigBee*. Em termos de custo, a utilização de tecnologia única reduz a necessidade de múltiplos módulos, minimizando gastos com hardware e simplificando a arquitetura do sistema.

Quanto à complexidade de implementação, o sistema UWB integrado requer atenção especial ao sincronismo e ao empacotamento de dados junto aos metadados de *ranging*, exigindo maior sofisticação no firmware embarcado e no processamento em tempo real, mas compensa essa complexidade com a eliminação de camadas intermediárias de rede.

No que tange ao desempenho operacional, a tecnologia UWB oferece elevada acurácia na medição de distância (tipicamente inferior a 10 cm), elevada imunidade a interferências e baixa latência, além de permitir comunicação robusta mesmo em

ambientes com multipercurso de sinal, o que a torna particularmente adequada para aplicações críticas em ambientes confinados ou com dinâmica elevada, como robótica móvel, rastreamento de ativos industriais e sistemas embarcados autônomos.

Para que essa ideia se cumpra com fidelidade, alguns pontos relevantes dentro da bibliografia analisada podem fornecer a chave para uma implementação eficiente. Como o sistema UWB é extremamente dependente do sistema de ancoragem, a escolha da quantidade de âncoras, sua disposição e a sua correta configuração, são aspecto de vital importância para a implementação da comunicação e localização simultâneas. Similarmente, o sistema depende dos módulos escolhidos e de sua correta parametrização, em especial, relacionada a como estes módulos acessarão ao meio físico.

Por fim, outro aspecto a ser considerado é a escolha de qual estratégia será adotada para alcançar este objetivo, ou seja, qual algoritmo embarcado será utilizado para realização da comunicação e localização. Nesse contexto, a análise a seguir considera as contribuições de alguns pesquisadores que obtiveram sucesso em suas pesquisas e ajudam a sustentar a ideia defendida nesta dissertação.

3.4.1 Rede de Ancoragem

A concepção que emprega UWB como uma solução abrangente para localização precisa e comunicação, requer antes um planejamento estratégico a fim de que todo esse potencial seja efetivamente convertido em desempenho e confiabilidade a serviço do sistema robótico, sobretudo em ambientes cooperativos envolvendo VANTs.

É de grande valia, portanto, um estudo prévio sobre a rede de ancoragem a ser adotada no ambiente. Uma distribuição correta de âncoras e *tags* é crucial para a otimização da relação entre custo operacional do sistema, geometria de medição favorável e cobertura de sinal suficiente, notadamente em ambientes onde condições de NLoS estão presentes.

A densidade e a disposição das âncoras e *tags*, além de influenciarem significativamente a precisão do posicionamento, também exerce forte impacto no desempenho da comunicação e transferência de dados. Assim, testes extensivos em diferentes ambientes são fundamentais para melhor compreensão sobre o desempenho de diferentes topologias do sistema, além da identificação de possíveis fontes de erro.

O trabalho de (NGUYEN; ZAINI; WANG; GUO *et al.*, 2019) é aqui tomado como exemplo de planejamento estratégico da rede de ancoragem que permitiu a

localização relativa de um VANT em relação a um VTNT em uma sala interna com transmissão de dados pela rede UWB. Ao invés de posicionar âncoras fixas no ambiente de operação, os pesquisadores optaram por colocar 2 âncoras a bordo do VTNT em lados opostos, e 5 *tags* no VANT, sendo uma em cada extremidade do quadricóptero, e uma *tag* central para comunicação com um laptop.

Os resultados do experimento de (NGUYEN; ZAINI; WANG; GUO *et al.*, 2019) demonstraram a eficácia do sistema integrado de localização relativa e comunicação para permitir o controle da posição relativa do VANT em relação ao VTNT, mesmo esse último estando em movimento e em velocidade desconhecida.

3.4.2 Parâmetros da Camada Física

Outro aspecto igualmente importante a ser considerado para o êxito na gestão integrada de localização e comunicação de dados é a configuração de parâmetros da camada física de UWB. Estratégias diferenciadas de detecção do sinal podem ser adotadas para mitigar problemas associados à multipercuro, conforme orienta (ZIKRUL HAKIEM; SALLEHUDDIN MOHAMED, 2023). A escolha do comprimento do preâmbulo e *payload*, por exemplo, exerce implicações significativas no desempenho da localização e transferência de dados.

Pacotes muito longos aumentam a utilização do espectro de RF podendo causar problemas de interferência entre os nós UWB, aumentando assim a taxa de erros e consequentemente a retransmissão de pacotes. Em contraste, um *payload* muito curto pode afetar negativamente a taxa de dados. O gerenciamento da eficiência energética também é afetado pelas escolhas de preâmbulo e *payload*, assim como a escolha da frequência de repetição dos pulsos, PRF.

A pesquisa de (ZIKRUL HAKIEM; SALLEHUDDIN MOHAMED, 2023) demonstra a importância da correta configuração de parâmetros na camada física, onde um experimento prático envolveu a implementação de um sistema de posicionamento interno, no qual foi posicionada uma âncora em cada um dos 4 cantos de uma sala como pontos de referência.

Apesar da condição LOS do experimento, alguns móveis representando obstáculos foram introduzidos no ambiente. Por meio de uma *tag* móvel, foram realizadas medições de distâncias em 5 diferentes pontos, primeiramente utilizando configurações padrão do módulo UWB, e em seguida, essas configurações foram refinadas e novas

leituras foram realizadas. A Tabela 3.2 lista as configurações usadas na pesquisa mencionada.

Tabela 3.2 - Configurações usadas na pesquisa mencionada.

Parâmetro UWB	Configuração padrão	Configuração refinada
- Taxa de bits	110 Kbps	6.81 Mbps
- PRF	64 MHz	64 MHz
- Tamanho preâmbulo	1024	512
- Ganho do transmissor	11.5 dB	15.5 dB

Fonte: (ZIKRUL HAKIEM; SALLEHUDDIN MOHAMED, 2023)

Os resultados do experimento de (ZIKRUL HAKIEM; SALLEHUDDIN MOHAMED, 2023) mostram que o refinamento nas configurações UWB trouxeram melhoria significativa na precisão das medições de posição. Mesmo os menores movimentos das etiquetas resultaram em leituras de posição mais precisas, com medições na faixa de milímetros.

3.4.3 Estratégias do Algoritmo

A otimização do design da rede UWB para que se cumpra a perspectiva de localização e comunicação de forma satisfatória também deve passar pela escolha estratégica do algoritmo e método de localização a ser aplicado. Cada método traz seus próprios méritos e limitações, e a escolha do mais adequado dependerá das características do ambiente e dos requisitos de precisão do sistema.

Combinar diferentes técnicas e utilizar abordagens híbridas pode ser uma estratégia eficaz para melhorar a precisão e a confiabilidade do sistema. Por exemplo, priorizar operações de localização relativa durante períodos críticos, pode permitir uma rápida atualização da posição dos robôs, mantendo a sincronização e prevenindo colisões. Por outro lado, identificar momentos específicos em que a comunicação de dados é crucial, como durante a coordenação de tarefas complexas ou durante a execução de manobras para dar ênfase a comunicação de dados.

Para ilustrar esse ponto, é conveniente citar o trabalho de (MOHAMMADMORADI; HEYDARIAAN; GNAWALI, 2019), onde a técnica SRAC otimiza a operação em redes UWB ao combinar a medição de distância entre nós e a comunicação de dados de forma simultânea. O SRAC emprega um algoritmo de agendamento adaptativo que monitora o tráfego de medição e de comunicação na rede

UWB. Com base em parâmetros como tamanho da janela, taxa de medição, limite de atraso e tamanho do *buffer*, o algoritmo decide o regime de medição mais adequado para otimizar o tráfego de rede.

O SRAC demonstrou uma redução efetiva de até 40% no tráfego total da rede. Os resultados indicam que o SRAC é capaz de manter a precisão na estimativa de distância entre os nós, com erros de medição inferiores a 7 cm e uma média de cerca de 5 cm. Esses resultados destacam a eficácia da técnica em otimizar a operação na rede UWB contribuindo para uma comunicação mais eficiente e confiável entre os nós da rede.

3.5 ATRASO DA ANTENA EM TRANSMISSÕES EM UWB

O atraso da antena (*antenna delay*) é um aspecto técnico de alta relevância em sistemas UWB, sendo fundamental para alcançar a precisão e confiabilidade exigidas em aplicações modernas. O atraso da antena refere-se a atrasos introduzidos por diferenças sutis nos componentes eletrônicos conectados à antena, pela geometria e material da antena, pelo layout da PCB do dispositivo e pelo ambiente operacional.

Em sistemas UWB, onde a precisão no tempo é fundamental, pequenos desvios ou variações no atraso da antena pode resultar em grandes erros na estimativa de tempo de chegada. Um atraso de antena não corrigido ou inadequadamente calibrado pode comprometer o desempenho do sistema de localização, causando desvios na posição calculada e diminuindo a confiabilidade das medições, especialmente em ambientes com reflexões de multipercurso ou alta densidade de obstáculos. Embora esses atrasos não afetem o tempo de voo (ToF) do sinal, eles influenciam os registros dos carimbos de tempo de transmissão e recepção, conforme descrito na equação

$$T_{medido} = t_{aTx} + ToF + t_{aRx} \quad (3.13)$$

Onde T_{medido} representa o tempo decorrido desde o carimbo de tempo de transmissão até o carimbo de tempo de recepção, t_{aTx} refere-se ao atraso da antena na transmissão, t_{aRx} denota o atraso da antena na recepção, e ToF corresponde ao tempo de voo do sinal.

3.5.1 Atraso de Grupo

Um dos temas mais amplamente discutidos em antenas UWB é o atraso de grupo. Trata-se da variação do tempo de propagação das diferentes frequências dentro da

largura de banda da antena. Para (PETROV; SMITH, 2020), sistemas UWB, que usam pulsos de curta duração e ampla largura de banda, variações no atraso de grupo podem levar a dispersões temporais, afetando fortemente a precisão de localização.

O atraso de uma antena UWB está diretamente relacionado ao seu design e às suas propriedades físicas. Diversos estudos exploraram a influência do formato da antena sobre esse atraso. Como exemplo, o artigo de (MCEVOY; JOHN; CURTO; AMMANN, 2008), que investigou diferentes modelos de antenas monopolo UWB e concluiu que a forma adotada exerce grande impacto na dispersão do sinal ao longo da largura de banda. Os testes mostraram que antenas com desenhos mais otimizados apresentaram menor variação no atraso, resultando em transmissão mais estável e com menos distorções, enquanto formatos mais simples apresentaram desempenho inferior. Esses resultados destacam a importância de um projeto cuidadoso da antena para garantir precisão no tempo e qualidade do sinal.

3.5.2 Atraso pelo Ambiente

O desempenho das antenas UWB e a precisão das medições de atraso também são influenciados por fatores externos e efeitos ambientais. Um exemplo é o estudo de (SUWAN; AIRPHAIBOON; PROMWONG, 2018), que investigou o impacto do corpo humano na transmissão UWB com foco na distorção da forma de onda e no tempo de atraso. Os resultados mostraram que a dispersão de atraso é notavelmente afetada pelo sombreamento causado pelo corpo humano, além das características da antena.

3.5.3 Calibração do Atraso da Antena

A calibração de fábrica, por si só, não garante a precisão esperada em diferentes contextos, pois a configuração final do dispositivo afeta diretamente os parâmetros de calibração. De acordo com (SHALABY; COSSETTE; FORBES; NY, 2023), essas variações podem impactar a precisão de sistemas de localização em tempo real baseados em UWB em várias dezenas de centímetros, considerando que os sinais de rádio se propagam à velocidade da luz. Para (SHAH; CHAIWONG; KOVAVISARUCH; KAEMARUNGSRI *et al.*, 2021), a calibração é essencial para melhorar a precisão da medição de distância e, conseqüentemente, o desempenho dos sistemas de localização.

O processo de calibração envolve métodos de medição através da troca de sinais entre dispositivos em condições controladas. Ajustes nos algoritmos de localização e

sincronização podem descontar os efeitos do atraso. (SHALABY; COSSETTE; FORBES; NY, 2023) propuseram um protocolo de medição juntamente com um procedimento robusto de calibração de atraso de antena validado com o uso de VANTs, resultando em uma melhoria média de 46% na precisão de localização.

3.6 FUSÃO DE UWB COM OUTROS SENSORES

Uma abordagem bastante usual e eficaz no aprimoramento de sistemas UWB é a integração de informações de diferentes fontes de dados por meio da fusão de sensores, que aumenta a robustez e confiabilidade do sistema. No entanto, desafios como ruído de medição, bloqueios de sinal e interferências ambientais podem comprometer a precisão e a segurança. A integração de múltiplos sensores, como IMUs (Unidades de Medição Inercial) e GNSS (Global Navigation Satellite Systems), pode mitigar esses problemas.

A utilização de fusão de sensores em sistemas UWB foi amplamente estudada e discutida por pesquisadores. Estratégias de fusão de sensores integram UWB com visão computacional (KAO; CHANG; TSENG; CHEN *et al.*, 2023; NGUYEN; NGUYEN; CAO; QIU *et al.*, 2019), sistema de navegação inercial (CHEN; XING; LI; WANG *et al.*, 2023; XU; SHMALIY; AHN; SHEN *et al.*, 2021), sistema magnético (BRUNACCI; ANGELIS, 2024) ou outras tecnologias de localização emergentes, constituindo abordagens de grande valor para investigações nesse domínio. (CHUNXU; HENRY; TOBY, 2022; YANG; YANG, 2021) propuseram uma plataforma integrada para localização tridimensional em ambientes internos baseada na combinação de UWB utilizando o método TWR, sensores IMU e câmeras de profundidade RGB-D.

O mundo dos esportes traz dois exemplos relevantes de fusão de UWB com outros sensores. O primeiro vem da parceria da liga profissional de futebol americano, National Football League (NFL), com a Zebra Technologies e a Wilson Sporting Goods, que desenvolveu um sistema avançado de rastreamento que combina UWB com visão computacional para monitorar em tempo real a posição da bola e dos jogadores com precisão centimétrica e em tempo real, possibilitando análises detalhadas de jogadas, velocidade, separação entre atletas e posicionamento da bola (SWEDBERG, 2023).

Outro exemplo é o da parceria da Adidas com a Kinexon, que resultou em um sistema capaz de rastrear a bola de futebol e detectar automaticamente quando ela cruza completamente a linha do gol. O sistema foi adotado pela FIFA e utilizado na Copa do Mundo de 2022, no Catar (ELSNER; HAGEMES; SELL; MOLTER *et al.*, 2022). A

Figura 12 (a) e (b) apresentam os aspectos das bolas de futebol da NFL e FIFA, respectivamente.

Figura 12 - (a) Tag implantada na bola da NFL, (b) Tag implantada na bola da FIFA



(a) Fonte: <https://qbx.wilson.com>. Acesso em: abr. 2025.



(b) <https://news.adidas.com/> Acesso em: abr. 2025.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção descreve os procedimentos adotados para o desenvolvimento, implementação e avaliação experimental de um sistema de localização em tempo real (RTLS) com comunicação simultânea de dados via UWB, aplicado a uma plataforma robótica móvel. Inicialmente, são apresentadas as estratégias de levantamento bibliográfico que fundamentaram a escolha da tecnologia e metodologias utilizadas. Em seguida, será detalhado o cenário experimental, os componentes empregados e os parâmetros configurados para a realização dos testes.

A abordagem experimental foi conduzida em ambiente interno com alta complexidade de propagação, visando avaliar o desempenho do sistema em condições adversas típicas de aplicações reais. Foram realizados testes com diferentes configurações de *payload* e tipos de antena, a fim de verificar a influência do volume de dados transmitidos e das características de irradiação sobre a estabilidade da comunicação e a precisão das medições de distância. O sistema embarcado foi implementado com base no chip DW1000, utilizando linguagem C e o *framework* Arduino, enquanto um programa supervisor em *Python* foi desenvolvido para recepção, reconstrução e exibição dos dados.

4.1 ESTRATÉGIAS DA PESQUISA

Essa pesquisa foi iniciada com a definição do escopo e tema focado na robótica cooperativa, especificamente na interação de múltiplos robôs sendo disciplinada pela

comunicação em UWB. A metodologia adotada envolveu uma abordagem sistemática para identificar e selecionar artigos relevantes sobre o tema. O estudo foi conduzido utilizando bases de dados amplamente reconhecidas no meio acadêmico como Scopus, IEEE Xplore, Science Direct e Google Scholar, entre outras bases indexadas e revisadas por pares.

Por meio de palavras-chave como “*Ultra Wideband*”, “*UWB Localization*”, “*UAV Indoor Localization*” e “*UWB Data communication*”, foram realizadas consultas nas bases cujos resultados foram filtrados para incluir apenas artigos publicados nos últimos 8 anos. Isso ajudou a garantir que estudos mais atualizados fossem considerados para uma primeira análise.

Os resultados foram então triados para uma avaliação preliminar da relevância de cada artigo em relação aos objetivos da pesquisa. Publicações foram selecionadas segundo um critério de abrangência envolvendo sistemas robóticos formados por VANTs. Cerca de 60 referências foram selecionadas, analisadas e sintetizadas. Os resultados foram organizados em uma planilha contendo o título, classificação do conteúdo alvo, um resumo das informações mais importantes e a relevância da publicação segundo um critério que priorizasse a investigação da dinâmica dos sistemas robóticos VANTs em redes UWB. A planilha contribuiu grandemente para disciplinar a localização dos assuntos em suas respectivas referências bibliográficas.

Uma ferramenta de gerenciamento bibliográfico também foi empregada na construção de uma base de dados para a melhor organização das referências e inserção automática das citações ao texto. A ferramenta também foi notavelmente útil para classificar o foco de cada artigo segundo suas aplicações de UWB para os fins de posicionamento/localização, comunicação, e esse duplo aspecto envolvendo VANTs num mesmo cenário. Foram analisados pontos como as técnicas de posicionamento e a influência do ambiente sobre o desempenho dos robôs. Também foram focados os pontos ligados à fusão de sensores complementares aos nós de UWB na tarefa de posicionamento, e ainda, a capacidade de transmissão de dados em banda ultralarga.

4.2 CENÁRIO E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Esta seção apresenta a configuração experimental empregada e as estratégias adotadas para validar o funcionamento do sistema RTLS baseado em UWB com transmissão simultânea de dados em ambiente interno. Para avaliar o desempenho do sistema, foi utilizada a estratégia de um cenário bidimensional (2D), definido por duas

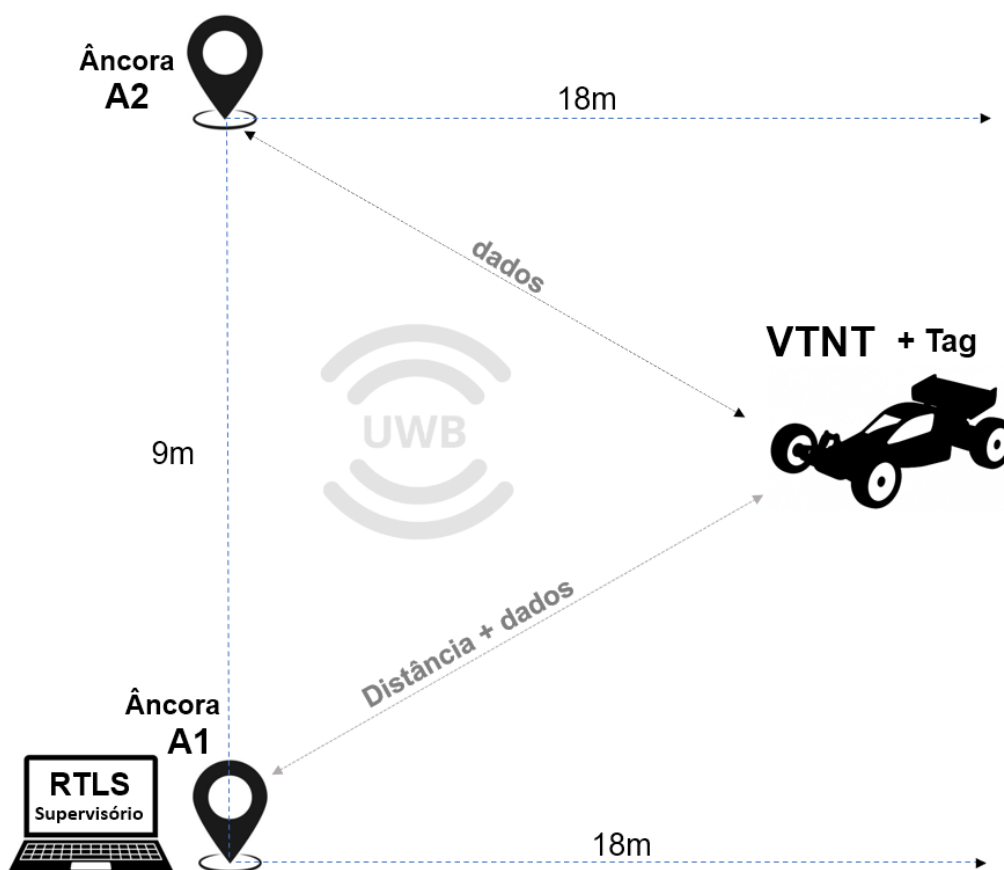
âncoras, reduzindo assim a complexidade associada à operação de veículos aéreos e focando na confiabilidade das medições e na integridade dos dados transmitidos.

Para isso, foi empregado um VTNT modelo automodelo *Tamiya* TS-12 em escala 1/10, guiado por controle remoto, originalmente equipado com motor à combustão e convertido para propulsão elétrica para o experimento. Esse veículo foi escolhido por sua robustez e estabilidade, permitindo o transporte de sistemas embarcados a bordo.

Foram utilizados três módulos transceptores UWB baseados no chip DW1000, conforme descrito na Seção 3.9. Dois desses módulos foram configurados como âncoras fixas (A1 e A2), enquanto o terceiro módulo operou como *tag* móvel embarcada em um VTNT.

A configuração do cenário experimental é apresentada na Figura 13.

Figura 13 - Cenário experimental.



Fonte: Elaboração Própria

As âncoras A1 e A2 foram montadas sobre hastes com 1 metro de altura. Considerando a área do cenário como um plano cartesiano, a haste de A1 foi posicionada na referência A1(0,0), origem dos eixos coordenados, e o de A2 foi posicionado a 9

metros, na posição A2(0,9), conforme o esquema mostrado na Figura 13. O VTNT operou livremente em uma área de 9 x 18m, ocupando a posição genérica T(x,y).

Os experimentos foram conduzidos em uma quadra poliesportiva dentro de um ginásio coberto, cujo ambiente destaca-se pela alta complexidade sob o aspecto da propagação do sinal. Estruturas de arcos treliçados e telhas metálicas compõem o teto. Portões e grades metálicas, além de arquibancadas de alvenaria, cercam parte do perímetro da quadra. Essa composição configura um ambiente suscetível a acentuadas reflexões de multipercurso, o que pode comprometer a qualidade da propagação do sinal de radiofrequência e afetar a precisão das medições.

O objetivo dos experimentos nesse ambiente foi o de explorar os desafios relacionados à interferência de sinal e avaliar o desempenho do sistema de posicionamento ao mesmo tempo em que transmite dados para um dispositivo. Foram analisadas diferentes combinações de parâmetros para avaliar o impacto sobre o desempenho do sistema, dentre os quais estão:

- Taxa de dados: 110 kbps, 850 kbps e 6.8 Mbps;
- Frequência de repetição de pulso (PRF): 16 MHz e 64 MHz;
- Tamanho do *payload* de dados: 8 bytes e 969 bytes.

A *tag* a bordo do VTNT foi responsável por iniciar a troca de mensagens envolvendo os *timestamps* e demais informações para medições de distâncias e potências em relação as duas âncoras. Depois de cada medição, um pacote de dados contendo essas informações foi então enviado para a âncora A1, juntamente com outros dados customizados que serão descritos em seção adiante.

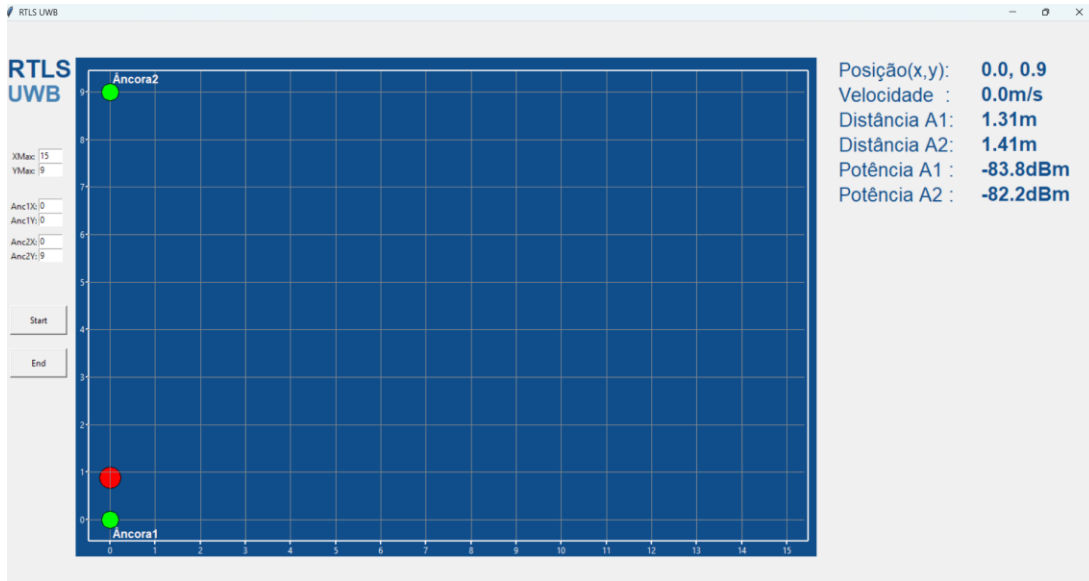
Nos experimentos realizados neste trabalho, foi utilizada uma versão modificada da biblioteca UWB *arduino-dw1000*, originalmente desenvolvida por Thomas Trojer (ThoTro) e colaboradores (TROJER; SAYOUS, 2019). As modificações foram implementadas com o objetivo de adaptar a biblioteca às necessidades específicas da pesquisa, permitindo, o envio simultâneo de dados e a medição de distância entre os módulos, além de facilitar a integração com os dispositivos embarcados utilizados nos testes experimentais.

O código embarcado do sistema UWB foi desenvolvido em linguagem C, utilizando o editor de código *Visual Studio Code* em conjunto com a extensão *PlatformIO*, que oferece um ambiente integrado para desenvolvimento, compilação e upload em microcontroladores por meio do *framework Arduino*. Paralelamente, um programa

supervisório foi implementado em linguagem Python, também utilizando *Visual Studio Code*, além de bibliotecas como *pyserial*, *tkinter* e *threading*.

O software supervisório, rodando em um *laptop* conectado via cabo à âncora A1, foi responsável por gerenciar a recepção de pacotes por meio de comunicação serial, reconstruir dinamicamente os fragmentos de dados recebidos e apresentar os resultados em uma interface gráfica, apresentada na Figura 14.

Figura 14 - Tela do Supervisório.



Fonte: Elaboração Própria

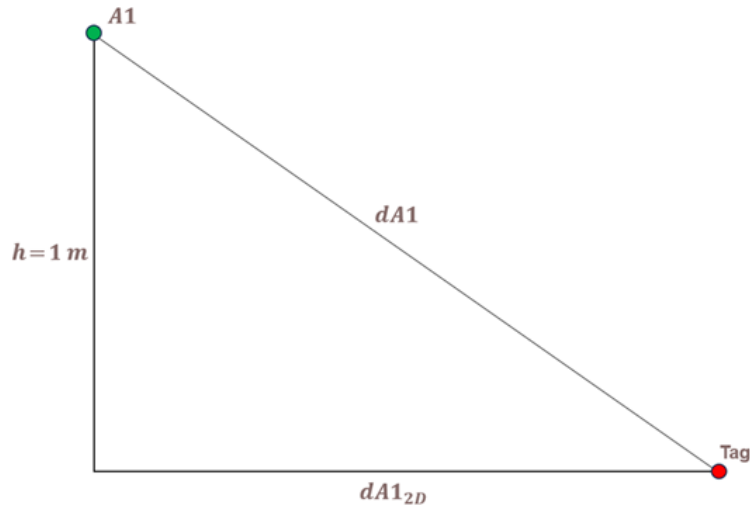
4.2.1 Estratégia de rastreamento do VTNT

Para a determinação das coordenadas x e y da posição do VTNT, foram utilizadas as distâncias tridimensionais $dA1$ e $dA2$, correspondentes às medições entre a *tag* e as âncoras A1 e A2, respectivamente. Considerando que as âncoras estavam posicionadas sobre hastes com altura conhecida de 1 metro, as distâncias foram projetadas para o plano 2D ($z=0$), resultando nas componentes $dA1_{2D}$ e $dA2_{2D}$. Figura 15 ilustra essa configuração, e as equações a seguir descrevem o procedimento de correção das distâncias e cálculo da posição.

$$dA1_{2D} = \sqrt{dA1^2 - 1^2} \quad (4.1)$$

$$dA2_{2D} = \sqrt{dA2^2 - 1^2} \quad (4.2)$$

Figura 15 - Geometria para projeção da distância da âncora A1 em plano bidimensional



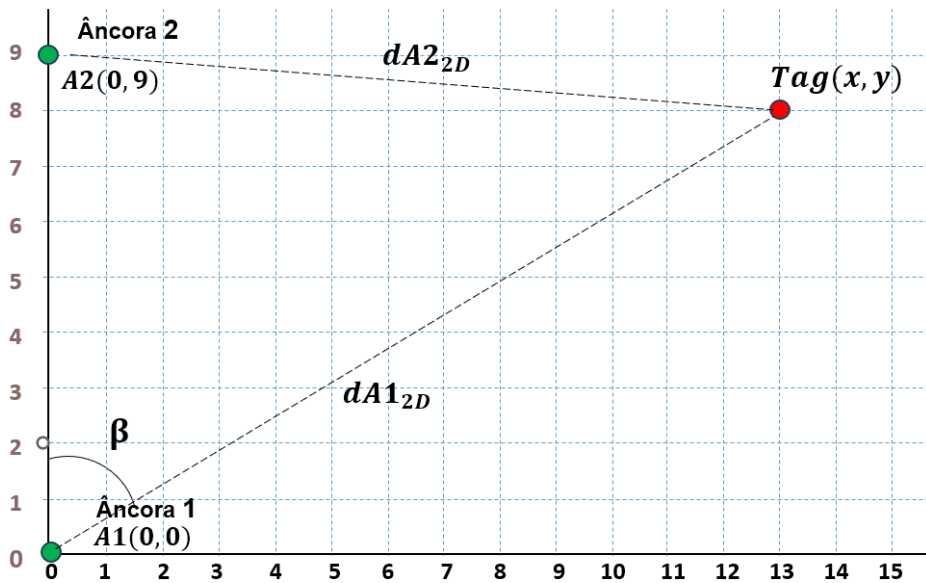
Fonte: Elaboração própria

O ângulo β , conforme a Figura 16, foi previamente calculado com base na Lei dos Cossenos, aplicada ao triângulo formado pelas âncoras A1, A2 e a tag. Considerando a distância de 10 metros entre as âncoras, o valor de β foi obtido conforme apresentado a seguir.

$$\cos(\beta) = \frac{9^2 + dA1_{2D}^2 - dA2_{2D}^2}{2 \cdot 9 \cdot dA1_{2D}} \quad (4.3)$$

$$\beta = \arccos \left(\frac{9^2 + dA1_{2D}^2 - dA2_{2D}^2}{2 \cdot 9 \cdot dA1_{2D}} \right) \quad (4.4)$$

Figura 16 - Representação geométrica do experimento.



Fonte: Elaboração própria

E finalmente as coordenadas de posição da *tag* puderam ser determinadas pelas equações:

$$x = dA_{2D} \cdot \sin(\beta) \quad (4.5)$$

$$y = dA_{2D} \cdot \cos(\beta) \quad (4.6)$$

O método de localização DS-TWR foi adotado nos experimentos por oferecer equilíbrio entre a complexidade de implementação, a precisão das estimativas de distância e a taxa efetiva de transmissão de dados. Além de ser simples de implementar, o DS-TWR também apresenta a vantagem de não exigir sincronização prévia entre os dispositivos da rede, o que facilita sua aplicação em sistemas embarcados com recursos limitados.

Diferente de métodos como ToA e TDoA, que dependem de relógios sincronizados entre os nós para estimar o tempo de voo do sinal, o DS-TWR realiza essa estimativa por meio da troca bidirecional de mensagens entre a *tag* e as âncoras, utilizando apenas os tempos registrados localmente. Essa característica eliminou a necessidade de hardware adicional para sincronização. Além disso, o DS-TWR é suportado pela biblioteca nativa do chip DW1000, apresentando baixa exigência computacional, característica favorável a sistemas embarcados.

A classe *DW1000Ranging* da biblioteca utilizada contém a implementação de um filtro suavizador do tipo média móvel exponencial (*Exponential Moving Average – EMA*), projetado para suavizar as medições de distância, mitigando os efeitos do ruído e das flutuações causadas por variações momentâneas nas condições de propagação do sinal. O filtro atribui maior peso às medições mais recentes, ao mesmo tempo em que preserva a influência das leituras passadas, garantindo uma resposta suavizada e menos suscetível a variações abruptas.

O uso do filtro resulta em medições mais consistentes em ambientes ruidosos ou com obstáculos, no entanto, pode introduzir latência no sistema, pois o cálculo de novas distâncias depende da consideração de medições anteriores. A classe também fornece o método *setRangeFilterValue(n)* para ajuste do grau de suavização, onde *n* é o número de elementos considerados na janela de suavização. Valores menores de *n* tornam o filtro mais responsivo a variações recentes, enquanto valores maiores promovem maior estabilidade nas medições, mas pagando-se o preço de um atraso proporcional ao tamanho da janela, uma vez que a influência de leituras passadas tem maior peso.

4.2.2 Estrutura de Dados Experimental

Por meio de testes preliminares, foi possível observar que os dados de controle do protocolo DS-TWR implementado pela biblioteca DW1000.cpp, tais como *timestamps* e parâmetros auxiliares para o sistema com duas âncoras, ocupam automaticamente as primeiras posições do *buffer* de transmissão, um vetor que opera como membro estático da classe DW1000Ranging, e é referenciado como DW1000Ranging.data[].

Esses dados são essenciais para o cálculo do tempo de voo do sinal entre a *tag* e as âncoras e são inseridos de forma transparente ao usuário nas posições de 0 a 44 do vetor de transmissão, sem necessidade de intervenção explícita. As posições subsequentes do vetor, a partir do *byte* 45, ficam disponíveis para dados customizados definidos pelo usuário, desde que o tamanho total da carga de dados não ultrapasse o limite máximo de 127 *bytes* para *payload* simples, ou 1023 *bytes* para *payload* estendido.

Assim, para evitar sobrescrita e garantir o correto funcionamento do protocolo de localização, os dados customizados da aplicação foram inseridos apenas a partir da posição 45 do vetor.

Para fins de avaliação comparativa, os testes foram organizados em dois cenários experimentais distintos: o primeiro, descrito na Seção 4.2.3, corresponde à operação com *payload* reduzido e uso de antenas omnidirecionais; o segundo, detalhado na Seção 4.2.4, refere-se à operação com *payload* estendido em conjunto com antenas direcionais. Essa divisão visa analisar o desempenho do sistema em diferentes cargas de dados.

4.2.3 Operação com Payload Reduzido e Antenas Omnidirecionais

Nessa primeira etapa, o sistema foi configurado para operar com uma carga reduzida de apenas 8 *bytes* de dados customizados e antenas omnidirecionais, de modo a caracterizar seu desempenho em uma configuração básica com menor volume de dados transmitidos. Essa condição buscou estabelecer uma referência de comportamento em termos de estabilidade do enlace e precisão das medições em um ambiente naturalmente sujeito a multipercurso.

O valor de 8 *bytes* foi definido a partir da necessidade de transmitir, em cada ciclo de medição, quatro parâmetros principais: as distâncias e potências de recepção entre a *tag* e cada uma das âncoras, A1 e A2. Cada uma dessas quatro grandezas foi codificada com 2 *bytes* (16 *bits*), totalizando os 8 *bytes* utilizados no campo de *payload* do *frame*.

Para a coexistência de dados de posicionamento e os dados de aplicação no mesmo *frame* físico UWB, foi adotado um *buffer* intermediário para armazenar os dados customizados a serem enviados junto com os dados de controle de *ranging* gerados pelo algoritmo DS-TWR. O *buffer* intermediário foi configurado para que os quatro primeiros *bytes* armazenassem a distância e a potência entre a *tag* e a âncora A1, enquanto os quatro *bytes* seguintes armazenavam as mesmas informações relativas à âncora A2, totalizando os 8 *bytes*, a Tabela 4.1 mostra como o vetor foi estruturado.

Tabela 4.1 - Estrutura do vetor intermediário para *payload* reduzido.

Byte	Dado a ser transmitido
0	MSB da distância entre VTNT e âncora 1
1	LSB da distância entre VTNT e âncora 1
2	MSB da potência recebida pela marca da âncora 1
3	LSB da potência recebida pela marca da âncora 1
4	MSB da distância entre VTNT e âncora 2
5	LSB da distância entre VTNT e âncora 2
6	MSB da potência recebida pela marca da âncora 2
7	LSB da potência recebida pela marca da âncora 2

Fonte: Elaboração própria

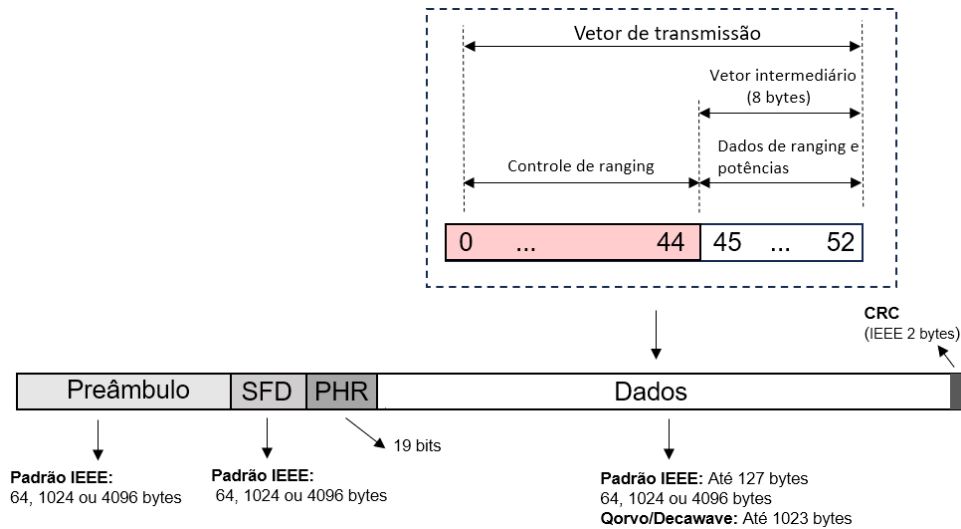
A Figura 17 ilustra como o *buffer* intermediário é inserido no vetor de transmissão, e como esse vetor, por sua vez, está alocado no campo de dados do quadro físico UWB.

Nesta etapa os módulos UWB das âncoras operaram com as antenas nativas de cerâmica, integradas à estrutura do módulo, com padrão quase omnidirecional e muito baixa diretividade. Essa antena nativa é otimizada para operação com frequência central em 6.5 GHz, que corresponde ao canal 5, com ganho que pode variar levemente conforme a direção do sinal devido ao padrão de radiação não isotrópico, mas o valor médio segundo a documentação do fabricante está em torno de 2 dBi.

A antena integrada, embora muito prática, pode ter ganho inferior à de antenas externas especializadas, sendo esse um fator importante em aplicações que demandam

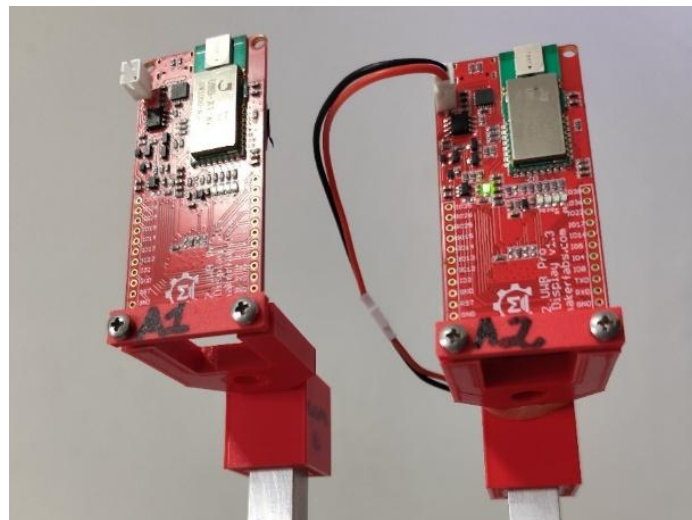
maior alcance, ganho ou direcionalidade. A Figura 18 apresenta os módulos das âncoras sobre as hastes.

Figura 17 - Representação dos vetores intermediários e de transmissão em um *frame* UWB com payload reduzido.



Fonte: Elaboração própria

Figura 18 - Âncoras com suas antenas nativas integradas, posicionadas sobre suas hastes.



Fonte: Elaboração própria

A precisão das medições de distância em sistemas baseados em UWB depende, entre outros fatores, da correta compensação dos atrasos introduzidos pelo hardware, especialmente aqueles associados às antenas. O atraso resulta tanto do design físico da antena quanto das condições do ambiente onde o sistema opera. Em locais com muita reflexão e múltiplos percursos de sinal, esse atraso pode se tornar ainda mais evidente, gerando erros sistemáticos se não for devidamente calibrado.

Foi adotado o método de calibração empírica do atraso de antena, onde o VTNT portando a *tag* foi posicionado a uma distância conhecida de 10 metros de cada âncora, e o valor do *delay* foi ajustado iterativamente no código das âncoras utilizando a função *setAntennaDelay()*, da biblioteca DW1000, até que a distância medida coincidisse com a distância física. Esse procedimento foi realizado individualmente cada uma das âncoras.

4.2.4 Operação com *Payload* Estendido e Antenas Direcionais

Nessa etapa foram aplicadas modificações no sistema com o objetivo de explorar o desempenho sob uma configuração mais exigente. Os módulos passaram a operar com recurso de *frames* estendidos, que permite um tamanho total de 1023 *bytes*, conforme descritos em (DECAWAVE, 2017), possibilitando o suporte a aplicações que exigem maior volume de informação por pacote. Desse total, 1015 *bytes* foram considerados úteis para armazenamento de dados no campo *payload* do *frame* físico, sendo 44 *bytes* requeridos reservados aos metadados de *ranging* do DS-TWR e 969 *bytes* para armazenar o vetor intermediário de dados para a transmissão.

As posições 0 e 1 do vetor intermediário foram reservadas para os caracteres (0xEB e 0xEC), adotados como assinatura de início do *chunk* de transmissão, necessária para garantir que o código Python do supervisor detecte o início de um novo pacote de dados recebido. As posições de 2 a 5 contém os *bytes* de informação de distância e potência recebida da âncora 1, da forma análoga, as posições de 6 a 9 contém os *bytes* de informação de distância e potência recebida da âncora 2. As posições 10 e 11 contém os 2 *bytes* (por padrão 0xFF e 0xD8) que marcam o início da imagem JPEG capturada pela câmera. As posições seguintes contém os dados da imagem em fragmentos.

A Tabela 4.2 mostra como os dados foram estruturados no *buffer* intermediário.

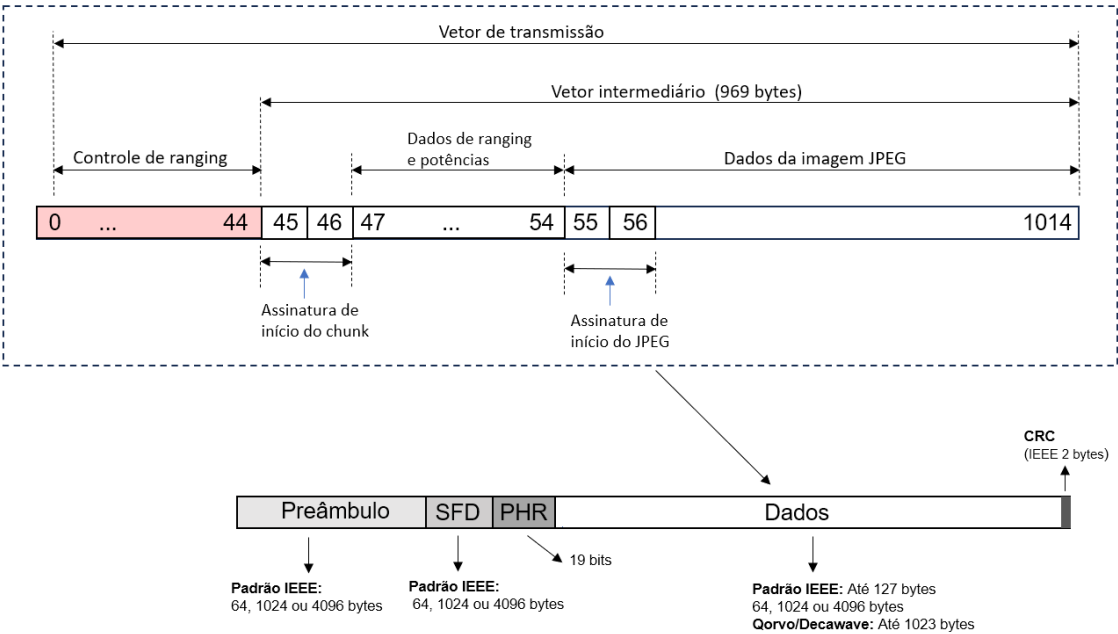
A cada novo ciclo de medição de distância, o *buffer* intermediário é copiado para o *buffer* de transmissão, responsável por armazenar as informações transmitidas via UWB. A Figura 19 ilustra a relação entre o vetor intermediário, o vetor de transmissão *DW1000Ranging.data[]* e o *frame* UWB.

Tabela 4.2 - Estrutura do *buffer* intermediário de dados para *payload* estendido.

Byte	Dados do <i>buffer</i> intermediário
0	Byte 1 de assinatura de início do <i>chunk</i> (0xEB)
1	Byte 2 de assinatura de início do <i>chunk</i> (0xEC)
2	MSB da distância entre VTNT e âncora 1
3	LSB da distância entre VTNT e âncora 1
4	MSB da potência recebida pela marca da âncora 1
5	LSB da potência recebida pela etiqueta da âncora 1
6	MSB da distância entre VTNT e âncora 2
7	LSB da distância entre VTNT e âncora 2
8	MSB da potência recebida pela marca da âncora 2
9	LSB da potência recebida pela marca da âncora 2
10	Byte 1 de assinatura de início do JPEG (0xFF)
11	Byte 2 de assinatura de início do JPEG (0xD8)
12-959	Dados da imagem JPEG incluído os 2 <i>bytes</i> de assinatura do final da imagem (0xFF 0xD9)

Fonte: Elaboração própria

Figura 19 - Representação dos vetores intermediários e de transmissão em um frame com *payload* estendido.



Fonte: Elaboração Própria

Segue a descrição das posições do vetor de transmissão:

- Posições 0 a 44: Reservadas para os dados brutos de *ranging* do protocolo DS-TWR.
- Posições 45 e 46: Reservadas para a assinatura 0xEBEC de início de um novo *chunk* para transmissão.
- Posições 47 a 54: Utilizadas para armazenar dados de distâncias e potências dos sinais recebidos das âncoras. Esses dados são utilizados no receptor para estimativas de posição, velocidade e qualidade do link.

Posição 55 em diante: Destinada ao armazenamento dos fragmentos de imagem JPEG capturados pelo módulo ESP32-CAM e empacotados em sequência. Os fragmentos foram transmitidos ao longo de múltiplos *frames* até a conclusão da imagem, com uso de identificadores de início e fim de imagem baseados nos delimitadores JPEG padrão (0xFFD8 e 0xFFD9).

Esta abordagem permitiu compatibilizar o sistema de localização com a transmissão de dados de imagem, mantendo ambos os tipos de informação encapsulados em um único *frame* sem nenhum conflito. Também facilita a separação e o tratamento dos dados no lado receptor, onde a lógica de processamento pode distinguir com precisão os blocos de informação com base nas posições ocupadas no vetor.

Além disso, essa segmentação é crítica para garantir que os dados de posicionamento não sejam corrompidos ou sobrescritos pelos dados de aplicação, mantendo a integridade e confiabilidade do sistema de RTLS.

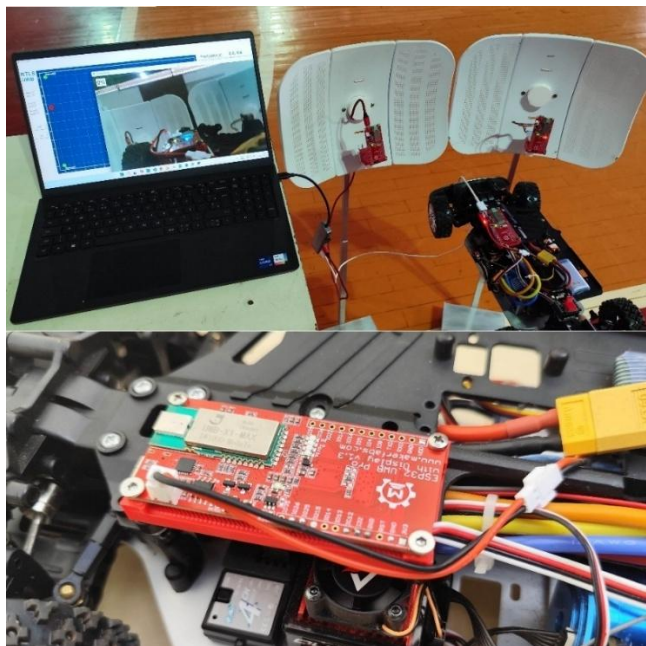
A estratégia assumida possibilitou avaliar de forma abrangente os impactos da transmissão simultânea de dados sobre a estabilidade do enlace e a confiabilidade das medições de distância. Com uma fração do *payload* significativamente maior para dados do usuário, e operação das âncoras com antena direcional, foi possível verificar aplicabilidade da localização pelo método DS-TWR envolvendo diferentes cargas de tráfego.

Outra modificação nessa etapa do experimento foi a adoção de parábolas refletoras, com dimensões de 362 x 267 x 184 mm e ganho de 23dBi. Foram acopladas de modo que as antenas integradas dos módulos operando como âncoras ficassem posicionados no foco das parábolas, ponto de concentração da energia dos feixes de transmissão e recepção. Essa estratégia foi assumida com vista no aumento do ganho

efetivo das antenas nativas e consequentemente a melhora da relação sinal-ruído das comunicações. A modificação requereu nova calibração do atraso de antena do sistema.

A parte superior esquerda Figura 20 apresenta o *laptop* executando o software supervisor, a direita está o arranjo de integração das parábolas com as âncoras. A parte inferior da imagem destaca o detalhe da montagem do módulo UWB e do sistema embarcado sobre o chassi do veículo.

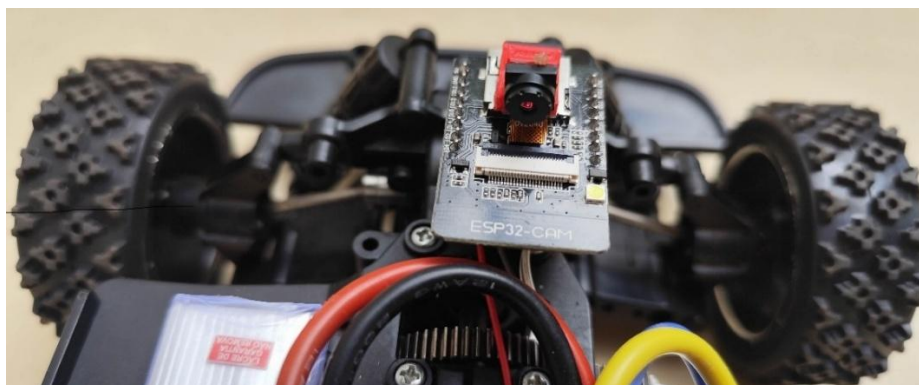
Figura 20 - Setup experimental para *payload* estendido.



Fonte: Elaboração Própria

Para a realização dos testes com *payload* estendido, foi incorporada ao sistema uma câmara ESP32-CAM, que possui um sensor de imagem e capacidade de compressão JPEG embarcada apresentado na Figura 21.

Figura 21 - ESP32-CAM a bordo do VTNT.

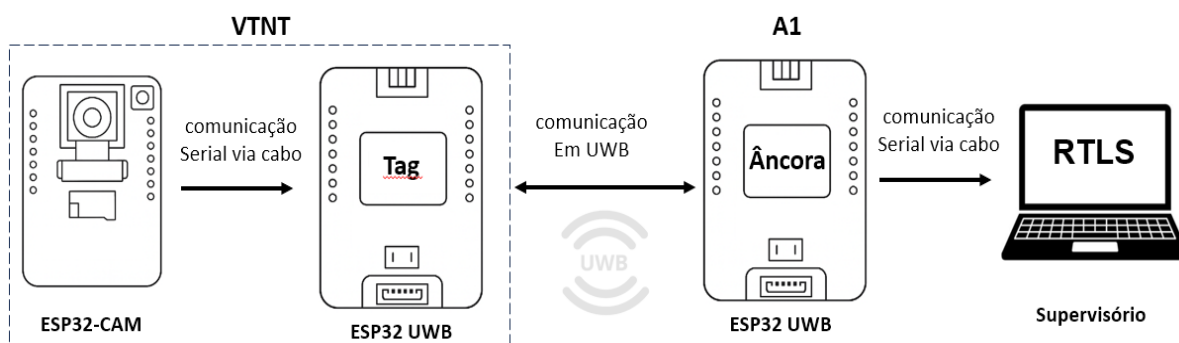


Fonte: Elaboração Própria

As imagens capturadas são temporariamente armazenadas em uma memória do tipo PSRAM, integrada ao ESP32-CAM. Em seguida, são entregues via conexão serial ao ESP32 que gerencia a *tag*, onde são fragmentadas em blocos e gradualmente inseridas no *buffer* intermediário. Depois disso o *buffer* é integrado ao vetor de transmissão e finalmente enviado à âncora 1.

A Figura 22 ilustra o fluxo dos dados de vídeo partindo da câmera até o supervisor.

Figura 22 - Fluxo dos dados de vídeo da câmera para o supervisor.



Fonte: Elaboração Própria

A cada nova medição de distância feita pelo método de medição DS-TWR, o vetor de transmissão contendo o *payload* de dados é automaticamente enviado da *tag* para a âncora A1. Essa integração do sistema de localização e transmissão de dados pelo canal em UWB, permite a transmissão de pacotes contendo informações de dados brutos de *ranging* e dados customizados, como fragmentos da imagem capturada pela câmera embarcada.

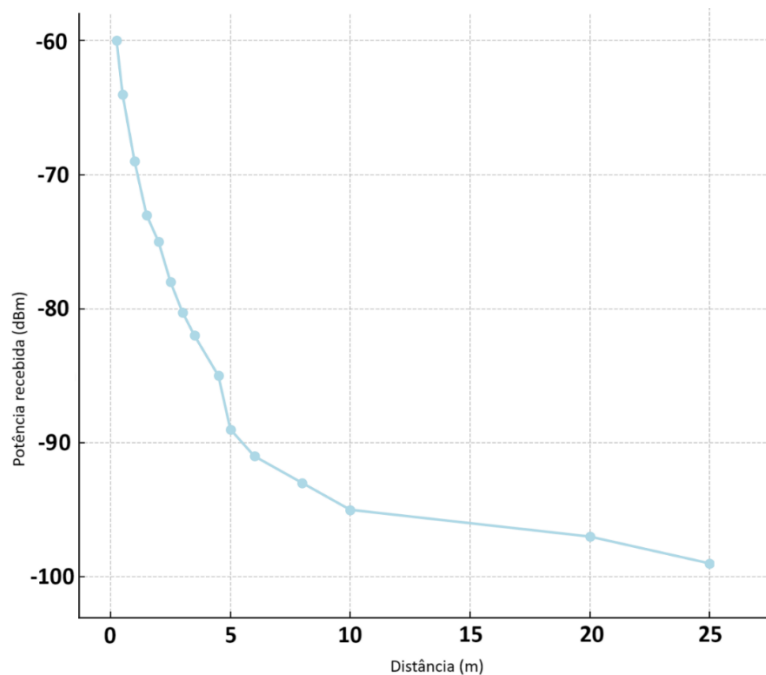
5 DESENVOLVIMENTO

Inicialmente, foi efetuado o processo de calibração do atraso das antenas e em seguida, foi realizada uma medição da potência recebida pela *tag* a partir da âncora A1, tomada como referência. O objetivo foi o de avaliar preliminarmente o comportamento do sinal em diferentes distâncias entre os dispositivos.

Nesse processo a distância entre os dispositivos foi variada ao longo de uma faixa linear de 25 metros. Nessa etapa, o sistema operou com taxa de transmissão de 110 Kbps, PRF 16MHz e preâmbulo de 2048 símbolos.

O gráfico apresentado na Figura 23 resume os resultados obtidos, que também forneceram subsídios para a definição preliminar dos limites operacionais do sistema.

Figura 23 - Potência recebida pela tag em função da distância com uma âncora.



Fonte: Elaboração Própria

É importante ressaltar que os valores de potência resumidos no gráfico acima, não representam uma medição absoluta em dBm, mas sim uma estimativa relativa, cujo valor é dependente da configuração do sistema, especialmente dos parâmetros como a taxa de transmissão, PRF e o comprimento do preâmbulo adotado.

Por meio de inspeção no código da biblioteca, verificou-se que a estimativa de potência é feita por meio de algoritmos que aplicam fórmulas empíricas distintas para cada configuração operacional. Assim, uma mesma condição real de potência no meio pode resultar em diferentes leituras indicadas pelo módulo, conforme as alterações nesses

parâmetros. Dessa forma, por não refletir uma medição física absoluta de potência, e sim uma referência relativa que varia conforme a configuração, os valores de potência indicados não foram considerados como métrica principal de avaliação no experimento, servindo apenas como apoio para a verificação preliminar do funcionamento da comunicação entre os módulos.

Para simular as condições de NLoS, foi posicionada uma fileira de bancos de madeira para assento, com extensão total de 5 metros, de modo a obstruir parcialmente a linha de visada entre os dispositivos.

No primeiro teste os parâmetros foram ajustados para uma configuração básica com taxa de 110 Kbps, PRF de 16 MHz e *payload* reduzido a apenas 8 *bytes* de dados customizados. Essa escolha conservadora visou reduzir a suscetibilidade à interferência de propagação. O VTNT foi posto em operação em velocidades de até 6 m/s dentro da área retangular de 9x18 metros, sendo 9 metros a distância entre as âncoras e 18 metros e extensão longitudinal, conforme a Figura 13.

Em seguida uma configuração intermediária foi assumida, com taxa de transmissão de 850 Kbps, frequência de repetição de pulso (PRF) de 16 MHz, e *payload* reduzido. Nessa configuração, foram realizados testes tanto com o filtro de medição de distância habilitado quanto desabilitado, a fim de avaliar seu impacto no desempenho do sistema. Depois disso o sistema assumiu a configuração refinada, com taxa de 6800 Kbps e PRF 64 MHz, mas operando ainda com *payload* reduzido de 8 *bytes*. A Tabela 5.1 resume a configuração dos parâmetros utilizada nos testes.

Tabela 5.1 - Parâmetros de configuração para o experimento.

Parâmetro	Configuração básica	Configuração intermediária	Configuração refinada
Taxa de transmissão	110 Kbps	850 Kbps	6800 Kbps
Frequência de repetição de pulso (PRF)	16 MHz	16 MHz / 64MHz	64 MHz
Comprimento do préambulo	2048 símbolos	2048 símbolos	2048 símbolos
Tamanho do <i>payload</i>	Reduzido (8 <i>bytes</i>)	Reduzido (8 <i>bytes</i>)	Reduzido (8 <i>bytes</i>)
Tamanho <i>payload</i>	Estendido (969 <i>bytes</i>)	Estendido (969 <i>bytes</i>)	Estendido (969 <i>bytes</i>)

Fonte: Elaboração própria

E finalmente, o sistema foi configurado com *payload* estendido, contendo 969 *bytes* de dados para a transmissão de fragmentos de imagens capturadas pela câmera embarcada no VTNT. Essa abordagem foi adotada de modo a avaliar a capacidade de transmissão de dados em paralelo à execução das medições de distância.

A utilização de *payloads* maiores permite o envio contínuo de dados visuais divididos em blocos menores, concatenados no receptor para reconstrução dinâmica da imagem. O valor de 969 *bytes* foi cuidadosamente definido levando em consideração a estrutura do vetor de transmissão *DW1000Ranging.data[]*, cuja capacidade total é de 1023 *bytes*. Como os 45 primeiros *bytes* são reservados para os dados do protocolo de *ranging* DS-TWR, restaram 978 *bytes* disponíveis.

Desse total, optou-se por utilizar 969 *bytes* para o envio de dados customizados, deixando as posições finais intencionalmente livres como margem de segurança, a fim de evitar estouros de *buffer* ou corrompimento de dados durante a transmissão em condições instáveis ou em ambientes ruidosos.

Essa abordagem representa um avanço em relação aos testes iniciais com *payload* reduzido, viabilizando aplicações em que a coleta de dados pelos robôs deve ocorrer simultaneamente ao rastreamento de posição, como em sistemas de navegação assistida ou monitoramento remoto de ambientes com mobilidade autônoma.

Na etapa com *payload* estendido, o filtro de medição foi ajustado para uma janela de suavização de 8 elementos. Testes foram realizados com taxas de 110 Kbps, 850 Kbps e 6800 Kbps, PRF de 64 MHz e preâmbulo de 2048 símbolos. Além disso, antenas direcionais passaram a integrar os módulos das duas âncoras.

O foco dos testes dessas abordagens esteve na análise da integridade dos dados customizados transmitidos, na estabilidade da posição estimada, na robustez do enlace de comunicação, e na influência dos parâmetros físicos de camada PHY sobre o desempenho global.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os principais resultados obtidos nos experimentos conduzidos com o sistema UWB. Foram organizados de acordo com as diferentes configurações de parâmetros adotadas e os modos de operação implementados. As análises foram estruturadas em dois blocos principais: o primeiro com foco em operações com *payload* reduzido, voltadas à avaliação da precisão e estabilidade da medição de distância em diferentes cenários; e o segundo considerando o uso de *payload* estendido, no qual o sistema passou a transmitir simultaneamente fragmentos de imagens junto aos dados de localização.

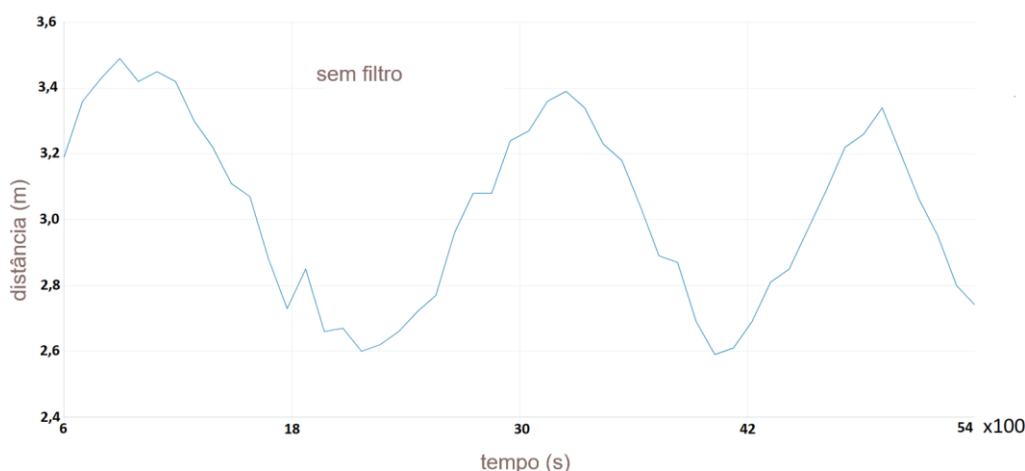
Os resultados obtidos são discutidos sob a ótica das propriedades inerentes à tecnologia UWB e das demandas práticas associadas à aplicação em sistemas cooperativos, destacando os principais compromissos de projeto observados. Essa abordagem oferece subsídios para a tomada de decisões de projeto em aplicações reais, especialmente aquelas que visam integrar localização e comunicação em plataformas móveis autônomas.

6.1 EXPERIMENTO COM *PAYLOAD* REDUZIDO

Resultados iniciais com *payload* reduzido, antenas nativas e a configuração básica de parâmetros, apresentaram variações súbitas nas medições de distâncias, com picos momentâneos afetando a precisão de localização.

A Figura 24 apresenta a forma de onda da variação temporal da distância da VTNT em uma trajetória oscilatória estratégica, onde o VTNT alterna periodicamente sua posição entre se afastar e se aproximar da âncora 1 entre 2,6 m e 3,5 m e sem barreiras. Esse comportamento de instabilidade pode ser visualizado graficamente no registro da medição, feita sem a aplicação do mecanismo de filtragem de medição, nativo da biblioteca.

Figura 24 - Forma de onda das medições de distância com configuração básica e filtro desabilitado.



Fonte: Elaboração Própria

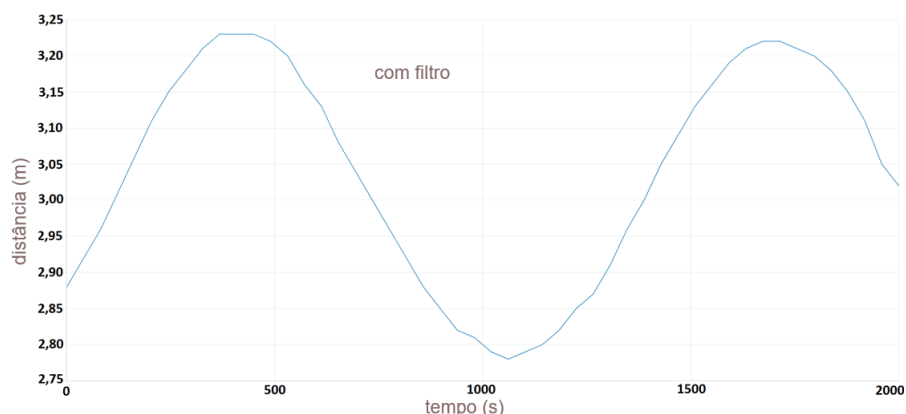
As flutuações observadas resultaram em uma degradação da precisão, que se manteve em aproximadamente 20 cm, independentemente da velocidade do VTNT. Esse resultado alinha-se com a configuração básica inicial adotada (Tabela 5.1), onde a baixa frequência de repetição de pulso (PRF) de 16 MHz reduz a quantidade de eventos de decisão de limiar, limitando a capacidade do sistema de diferenciar sinais espaçados no tempo e tornando-o mais suscetível a erros impostos pelo ambiente, causando impacto negativo diretamente a precisão.

Posteriormente, o filtro de medição foi ativado e ajustado com uma janela de 15 amostras, mantendo a mesma configuração paramétrica. Observou-se uma melhora da precisão para cerca de 10 cm em condição estática, ou seja, com o VTNT parado. No entanto, sob condições dinâmicas, o erro de posição aumentou proporcionalmente à velocidade do VTNT, excedendo um erro de 30 cm para velocidades acima de 2 m/s.

Esse comportamento era esperado dado o processamento matemático baseado em medições passadas aplicado pelo filtro para suavizar a medição. Mudanças rápidas na posição da *tag* demoram um pouco mais para se refletirem nas medições, uma vez que o sistema "confia mais" na média histórica.

O filtro efetivamente mitigou as flutuações aleatórias, por outro lado, ele também introduziu latência nas medições. A Figura 25 apresenta a forma de onda da medição feita com configuração básica e filtro de medição habilitado.

Figura 25 - Forma de onda das medições de distância com configuração básica e filtro habilitado.

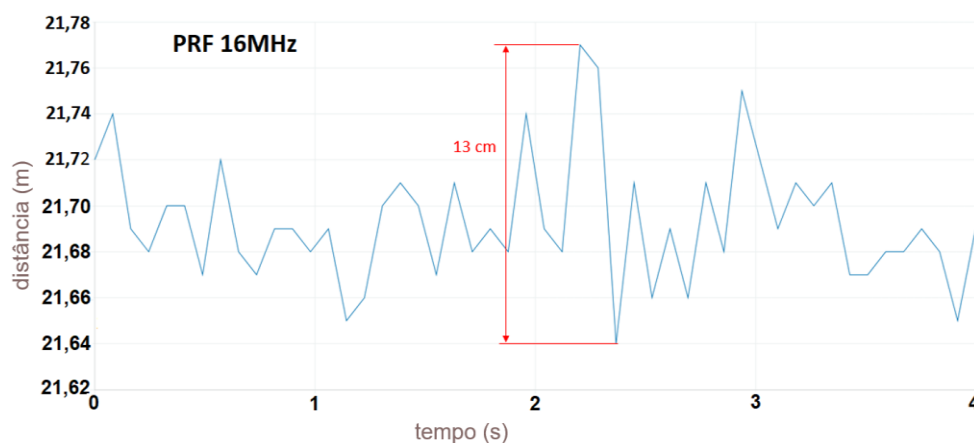


Fonte: Elaboração Própria

Mantendo o ambiente experimental sem alterações, os parâmetros foram redefinidos assumindo a configuração intermediária. Com uma taxa de transmissão mais alta, mas ainda com PRF de 16MHz. Com taxa mais alta, o sistema processa medições mais rapidamente, alinhando-se mais com as demandas de rastreamento em tempo real e medições frequentes.

Observou-se que o aumento da taxa para 850Kbps proporcionou melhoria na precisão dos resultados da medição de distância para cerca de 13 cm em condição estática do VTNT. As medições foram registradas a uma distância de aproximadamente 15 metros medidos entre a *tag* e âncora A1, sem o filtro de suavização. A Figura 26 apresenta a forma de onda registrada na janela de tempo observada com configuração intermediária.

Figura 26 - Forma da janela de tempo observada com configuração intermediária.

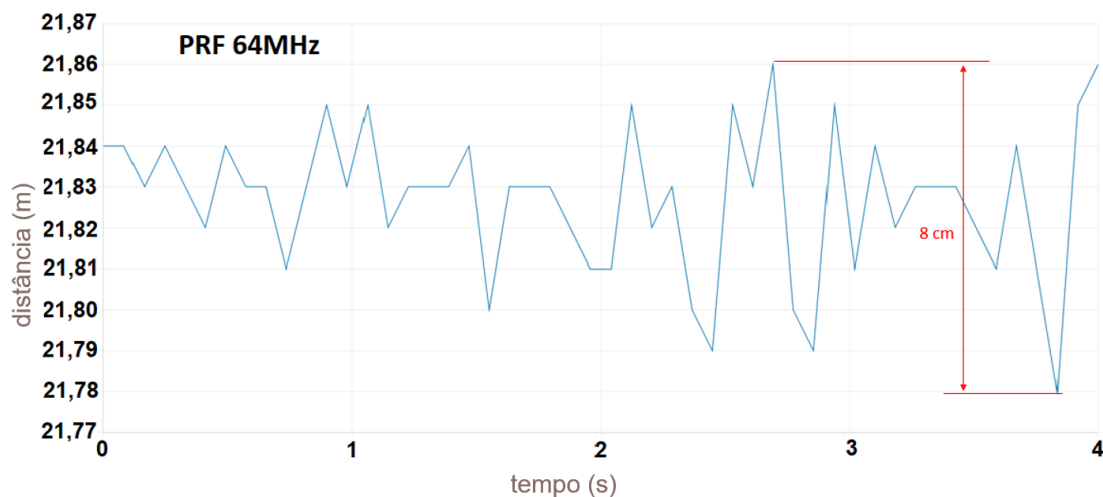


Fonte: Elaboração Própria

Assumindo-se a configuração refinada, observou-se que o erro máximo em condição estática diminuiu de 13 cm para 8 cm. No entanto, o sistema experimentou

maior instabilidade em condições dinâmicas do VTNT, incluindo perda de pacotes e interrupções momentâneas a distâncias superiores a 15 metros, especialmente em regiões de obstrução pelos obstáculos. A forma de onda da medição em configuração refinada registrada dentro da janela de tempo observada é apresentada na Figura 27.

Figura 27 - Forma da janela de tempo observada com configuração refinada.



Fonte: Elaboração Própria

As configurações intermediária e refinada melhoraram a precisão dos resultados tanto espacialmente, com erros reduzidos para aproximadamente 10 cm, quanto temporalmente, pois a ausência de filtragem quase eliminou a latência de medição.

Esses resultados sugerem que, para sistemas que priorizam alta precisão em medições de distância sob condições estáticas ou com velocidades de *tag* abaixo de 1 m/s, o uso de um filtro de medição com tamanho da janela de amostras mais ampla e PRF de pelo menos 64 MHz é recomendável.

Em cenários que exigem atuação dinâmica de *tags*, o uso do filtro deve ser considerado com janelas menores devido à latência que ele introduz em medições sequenciais.

Para sistemas em que a *tag* opera a distâncias superiores a 20 metros das âncoras e a precisão não é crítica, particularmente sistemas alimentados por bateria, uma configuração com PRF de 16 MHz e taxa de 110 Kbps ou mesmo 850 Kbps parece mais adequada, pois reduz as demandas de energia, aumentando a eficiência energética geral. Os resultados estão resumidos na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Resultado do experimento com *payload* reduzido.

Parâmetro avaliado	Resultado observado
Taxa de dados: 110 Kbps, PRF: 16 MHz.	-Erro de localização de ~20 cm quando sem filtro; -Atraso de localização superior a 30 cm para velocidades acima de 2 m/s com filtro de janela 15 amostras. -Integridade dos dados recebidos
Taxa de dados: 850 Kbps, PRF: 16 MHz.	-Erro de ~13 cm em condição estática do VTNT; sem filtro -Integridade dos dados recebidos
Taxa de dados: 6800 Kbps, PRF: 64 MHz., Posição estática VTNT	-Erro de ~8 cm em condição estática do VTNT; sem filtro -Integridade dos dados recebidos

Fonte: Elaboração Própria

6.2 EXPERIMENTO COM *PAYLOAD* ESTENDIDO

Durante os testes com *payload* estendido, observou-se a insuficiência da configuração básica (Tabela 5.1) para gerenciar simultaneamente a medição de distância e o envio dos pacotes estendidos de dados. Além disso, em testes com as configurações intermediária e, especialmente, a refinada, foram observadas interrupções momentâneas na comunicação nos trechos em que o VTNT perdeu a linha de visada direta com as âncoras.

Esse comportamento sugere que uma maior duração de transmissão decorrente do aumento do *payload* elevou a ocupação do canal, tornando o sistema mais instável, sobretudo diante dos obstáculos físicos inseridos no cenário. Diante disso optou-se pela estratégia de reforço de ganho dos sinais. De fato, observou-se que o acoplamento das parábolas refletoras trouxe uma melhora expressiva na estabilidade da comunicação, mesmo nos pontos críticos e até uma distância limite de 15 metros de cada âncora.

A configuração intermediária (Tabela 5.1) proporcionou uma detecção fluida da posição do VTNT com transmissão dos dados de imagem estável dentro de uma área efetiva de 9x12 metros, mesmo em velocidades próximas ao limite superior, que é de 6m/s. Ao longo do percurso, o módulo ESP32-CAM capturou imagens no formato JPEG com resolução *high-definition* (HD) de 1280x720 com tamanhos variando entre 60 KB e 90 KB. Essa variação ocorre devido à natureza do algoritmo de compressão JPEG, que ajusta o tamanho final do arquivo de acordo com a complexidade visual da cena, onde

imagens com mais detalhes, texturas e variações de cor, tendem a gerar arquivos maiores, enquanto cenas mais homogêneas resultam em tamanhos menores.

Os resultados estão resumidos na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Resultado do experimento com *payload* estendido.

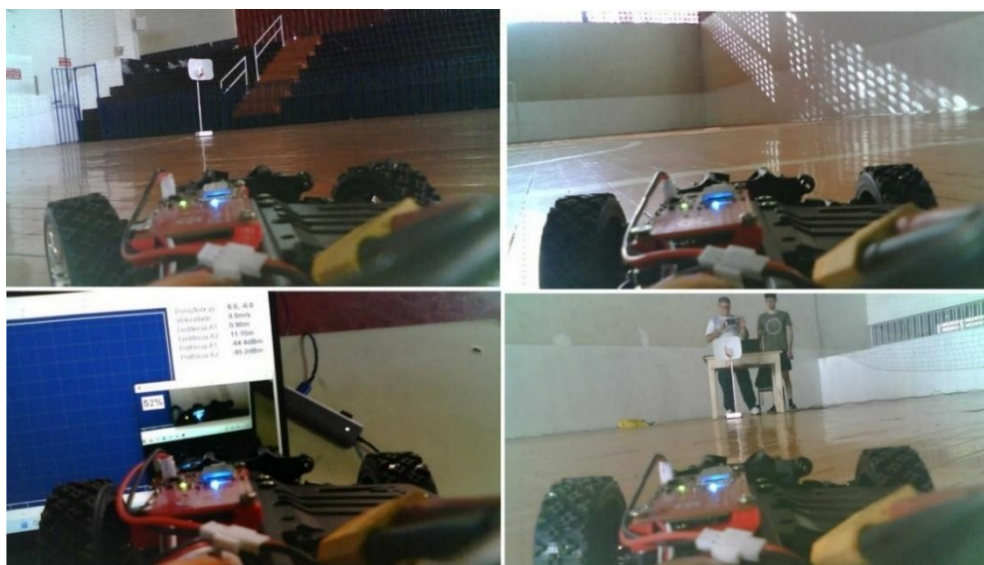
Parâmetro avaliado	Resultado observado
Taxa de dados: 110 Kbps, PRF: 16 MHz.	-Insuficiente para <i>payload</i> estendido.
Taxa de dados: 850 Kbps, PRF: 16 MHz.	-Erro de ~13 cm em condição estática do VTNT; filtro com janela de 8 amostras. -Integridade dos dados recebidos.
Taxa de dados: 850 Kbps, PRF: 64 MHz.	-Erro de ~8 cm em condição estática do VTNT; filtro com janela de 8 amostras. -Integridade dos dados recebidos
Taxa de dados: 68000 Kbps, PRF: 64 MHz.	-Erro de ~8 cm em condição estática; filtro com janela de 8 amostras; bloqueios eventuais diante de NLoS. -Perdas de pacotes em NLoS.

Fonte: Elaboração Própria

O tempo de transmissão de cada imagem ficou entre aproximadamente 3 e 4 segundos. As imagens foram capturadas com um intervalo fixo de 5 segundos entre uma aquisição e outra, demonstrando que, mesmo com a variabilidade no tempo de envio, o sistema conseguiu manter a estabilidade na recepção e reconstrução dos dados visuais.

A Figura 28 apresenta imagens capturadas e transmitidas no experimento.

Figura 28 - Imagens capturadas pela câmera embarcada e transmitidas em UWB.



Fonte: Elaboração Própria

Observou-se nos experimentos que, mesmo com a estabilidade da configuração com taxa nominal de 850 Kbps, a taxa efetiva de envio de dados durante as operações se manteve significativamente inferior. Essa limitação decorre da natureza do método DS-TWR, que exige trocas sucessivas de mensagens bidirecionais entre a *tag* e as âncoras para o cálculo da distância, com intervalos de espera definidos entre os envios. Cada ciclo de medição apresentou duração de cerca de 100 milissegundos.

Como consequência, houve uma redução na disponibilidade do canal para a transmissão contínua de dados, impactando a taxa efetiva de transmissão, especialmente com a utilização do *buffer* estendido. Por outro lado, o DS-TWR dispensou a necessidade de sincronismo entre os nós da rede.

A tecnologia UWB oferece suporte para diversas outras abordagens. Como exemplo o método de localização TDoA, que permite uma operação mais passiva por parte da *tag*, reduzindo o número de mensagens trocadas e potencialmente liberando mais tempo de canal para a transmissão de dados. Contudo, essa abordagem requer um sistema de ancoragem sincronizado em tempo real, o que adiciona complexidade tanto no hardware quanto no software de controle do sistema, e pode não ser viável em todas as aplicações.

Com base nas prioridades e demandas de cada projeto, estratégias mistas podem ser adotadas, como o agendamento alternado de tarefas de localização e transmissão de dados. Nesses casos, é possível configurar o sistema para priorizar, por exemplo, a obtenção de medições de distância com maior frequência em momentos críticos de navegação ou controle, enquanto em outros momentos menos sensíveis, o foco pode ser deslocado para a transmissão de dados, como imagens ou telemetria. Essa abordagem flexível pode otimizar o uso do canal UWB e garantir maior eficiência conforme as exigências operacionais da aplicação.

Outro fato observado foi que, ao operar com a configuração refinada, com taxa de transmissão de 6800 Kbps, o sistema apresentou bloqueios momentâneos de sinal diante das condições de NLoS, independente da velocidade de deslocamento do VTNT, levando a pequenas interrupções na recepção no supervisor. Observou-se que, sob taxas de transmissão mais elevadas, a comunicação tornou-se instável na região com condições de NLoS presentes, o que sugere sensibilidade do sistema a fatores como atenuação do sinal, multipercurso e interferência local.

Contudo, é importante considerar que a *tag* esteve posicionada a apenas 7 cm do solo, altura determinada pela estrutura do VTNT. Essa proximidade com o plano de propagação favorece a ocorrência de atenuações por absorção e reflexões no solo. Em frequências onde o comprimento de onda é da ordem de centímetros, como em UWB, esse fator pode contribuir de forma significativa para a degradação do sinal, intensificando as perdas em condições de NLoS.

Ainda assim, a estratégia de realização dos experimentos em um plano bidimensional, utilizando o VTNT como plataforma de testes, mostrou-se vantajosa por simplificar a análise dos dados e eliminar a complexidade associada às medições em três dimensões (3D), como ocorreria em experimentos diretamente com VANTs.

Essa abordagem permitiu avaliar de forma controlada e repetível os efeitos da configuração dos módulos e das condições do ambiente sobre a qualidade da comunicação e a precisão do sistema, oferecendo uma base sólida para futuras implementações em cenários mais dinâmicos. Os resultados aqui obtidos constituem a base para a posterior expansão do sistema para ambientes tridimensionais, incluindo aplicações embarcadas em veículos aéreos não tripulados.

As análises realizadas indicam que o projeto de um sistema UWB exige a busca constante por um ponto de equilíbrio entre múltiplas variáveis. O perfil do ambiente, a topologia da rede de ancoragem, os parâmetros da camada física e as estratégias adotadas pelo algoritmo formam um conjunto de decisões interdependentes, no qual a otimização de um aspecto pode implicar a penalização de outro. A consciência desses compromissos é determinante para alcançar um desempenho otimizado em aplicações reais, tornando essencial que o projetista compreenda os trade-offs inerentes ao processo de configuração e saiba trabalhar essas variáveis de maneira equilibrada, assegurando que o sistema final seja robusto, eficiente e alinhado aos objetivos da aplicação.

Assim, ao demonstrar a viabilidade da integração entre localização e comunicação via UWB, mesmo diante das limitações mencionadas, este trabalho fornece parâmetros concretos sobre taxas de dados, configurações de PRF, uso de antenas direcionais e impacto de obstáculos na estabilidade do enlace. Dessa forma, o projetista encontra aqui não apenas evidências experimentais de que é possível reduzir a dependência de múltiplas tecnologias (como Wi-Fi e Bluetooth), mas também orientações sobre como ajustar o sistema de acordo com diferentes requisitos de aplicação.

Em síntese, esta pesquisa constitui um guia de projeto inicial para o dimensionamento de sistemas que busquem unificar posicionamento e transmissão de

dados em um mesmo enlace UWB, reduzindo custos, complexidade e consumo energético. O futuro projetista encontra neste trabalho um referencial experimental e metodológico capaz de ser adaptado e expandido em aplicações reais de robótica cooperativa, automação industrial e comunicação embarcada.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho investigou e validou experimentalmente o uso da tecnologia UWB como solução integrada para localização relativa e transmissão de dados em ambientes cooperativos envolvendo VANTs. A pesquisa partiu da premissa de que a unificação dessas duas funcionalidades, posicionamento e comunicação, em uma única estrutura baseada em UWB poderia simplificar a arquitetura dos sistemas embarcados, reduzir o consumo energético, minimizar o custo e a complexidade dos sistemas.

Através de testes com um veículo terrestre não tripulado (VTNT), observou-se que o sistema UWB foi capaz de realizar a medição de distância com precisão subdecimétrica em diversas configurações, inclusive em condições de ausência de linha de visada. Simultaneamente, foi possível transmitir dados de imagens JPEG capturadas por um módulo ESP32-CAM embarcado, utilizando o canal UWB como meio único de transporte de dados e informações de posicionamento.

Essa capacidade de unificação demonstra uma vantagem exclusiva da tecnologia UWB ao eliminar a necessidade de tecnologias de comunicação adicionais, fornecendo uma solução econômica e simplificada.

A presente pesquisa identificou uma lacuna na literatura existente, um espaço ainda pouco explorado sugerindo a necessidade de aprofundar investigações sobre a aplicação do UWB em operações de localização e comunicação em ambientes cooperativos, em que a combinação das notáveis características de medição de distância e de transferência de dados um único sistema UWB pode impulsionar grandes avanços no sentido de tornar as arquiteturas robóticas autônomas mais enxutas e eficazes, abrindo caminho para futuras aplicações como em inspeção industrial, operações de busca e salvamento e monitoramento em ambientes de difícil acesso.

Pesquisas futuras se concentrarão na validação dessas descobertas em cenários do mundo real, abordando ambientes dinâmicos e mais complexos para aprimorar ainda mais a aplicabilidade prática de sistemas baseados em UWB. Investigações adicionais explorarão configurações avançadas de software e estratégias de otimização para maximizar a precisão e a eficiência, abrindo caminho para soluções abrangentes e escaláveis adaptadas às demandas das redes de VANTs de próxima geração.

Espera-se que o presente trabalho possa inspirar novas pesquisas e aplicações práticas, consolidando UWB como tecnologia impulsionadora para a criação de soluções inteligentes e inovadoras.

REFERÊNCIAS

AL-BAWRI, S. S.; ISLAM, M. T.; SINGH, M. J.; JAMLOS, M. F. *et al.* RSS-Based Indoor Localization System with Single Base Station. **Computers, Materials & Continua**, 70, n. 3, 2022. <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.020781>

ALARIFI, A.; AL-SALMAN, A.; ALSALEH, M.; ALNAFESSAH, A. *et al.* Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances. **Sensors**, 16, p. 1-36, 05/16 2016. <https://doi.org/10.3390/s16050707>

BENGTSON, F.; HEGGEN, S. A Data Communication System Using Ultra Wideband (UWB) Technology. **Proceedings of the 2005 National Conference on Undergraduate Research (NCUR)**, Washington and Lee University, Virginia Military Institute, Lexington, Virginia, 01/01 2005.

BIBBÒ, L.; CAROTENUTO, R.; DELLA CORTE, F. An Overview of Indoor Localization System for Human Activity Recognition (HAR) in Healthcare. **Sensors**, v.22, n. 21, DOI: 10.3390/s22218119. <https://doi.org/10.3390/s22218119>

BONCI, A.; CAIZER, E.; GIANNINI, M. C.; GIUGGIOLONI, F. *et al.* Ultra Wide Band communication for condition-based monitoring, a bridge between edge and cloud computing. **Procedia Computer Science**, 217, p. 1670-1677, 2023/01/01/ 2023. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.367>

BRENA, R. F.; GARCÍA-VÁZQUEZ, J. P.; GALVÁN-TEJADA, C. E.; MUÑOZ-RODRIGUEZ, D. *et al.* Evolution of Indoor Positioning Technologies: A Survey. **Journal of Sensors**, 2017, p. 2630413, 2017/03/29 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/2630413>

BRUNACCI, V.; ANGELIS, A. D. Fusion of UWB and Magnetic Ranging Systems for Robust Positioning. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 73, p. 1-12, 2024. DOI: [10.1109/TIM.2023.3343784](https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3343784)

CHEN, S.; XING, A.; LI, X.; WANG, Y. *et al.*, 2023, **Robust UWB Navigation System for UAV Swarm**. 101-105. DOI: [10.1109/ICMRE56789.2023.10106570](https://doi.org/10.1109/ICMRE56789.2023.10106570)

CHENG, Y.; ZHOU, T. **UWB Indoor Positioning Algorithm Based on TDOA Technology**. 2019. 777-782 p. DOI: [10.1109/ITME.2019.00177](https://doi.org/10.1109/ITME.2019.00177)

CHOI, B.; LA, K.; LEE, S., 2018, **UWB TDOA/TOA measurement system with wireless time synchronization and simultaneous tag and anchor positioning**. 1-6. DOI: [10.1109/CIVEMSA.2018.8439949](https://doi.org/10.1109/CIVEMSA.2018.8439949)

CHUNXU, L.; HENRY, B.; TOBY, W. Ultra-Wideband Communication and Sensor Fusion Platform for the Purpose of Multi-Perspective Localization, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22186880>

COPPENS, D.; SHAHID, A.; LEMEY, S.; HERBRUGGEN, B. V. *et al.* An Overview of UWB Standards and Organizations (IEEE 802.15.4, FiRa, Apple): Interoperability

Aspects and Future Research Directions. **IEEE Access**, 10, p. 70219-70241, 2022. DOI: [10.1109/CIVEMSA.2018.8439949](https://doi.org/10.1109/CIVEMSA.2018.8439949)

DE COCK, C.; TANGHE, E.; JOSEPH, W.; PLETS, D. Robust IMU-Based Mitigation of Human Body Shadowing in UWB Indoor Positioning. **Sensors**, 23, n. 19, 2023. Article. <https://doi.org/10.3390/s23198289>

DECAWAVE, L. DW1000 User Manual. 2017.

DEWBERRY, B.; PETROFF, A. **Precision Navigation with Ad-hoc Autosurvey using Ultra Wideband Two Way Ranging Networks**. 2015.

DROBCZYK, M.; STROWIK, C.; PHILPOT, C., 2017, **A wireless communication and positioning experiment for the ISS based on IR-UWB**. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85019651972&doi=10.1109%2fWCNC.2017.7925487&partnerID=40&md5=7ccdec9b0ed53d38091e2b4c2ab15cc8>.

ELSNER, J.; HAGEMES, F.; SELL, S.; MOLTER, S. *et al.* **Ball Tracking Performance of the Adidas FIFA World Cup Qatar 2022 "Al Rihla" Connected Ball and KINEXON Pulse Tracking System**. Adidas AG & KINEXON Sports & Media GmbH. 2022.

FAMILI, A.; STAVROU, A.; WANG, H.; PARK, J. M. PILOT: High-Precision Indoor Localization for Autonomous Drones. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, 72, n. 5, p. 6445-6459, 2023. DOI: [10.1109/TVT.2022.3229628](https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3229628)

GAO, Z.; JIAO, Y.; YANG, W.; LI, X. *et al.* A Method for UWB Localization Based on CNN-SVM and Hybrid Locating Algorithm. **Information**, v.14, n. 1, DOI: 10.3390/info14010046. <https://doi.org/10.3390/info14010046>

GNAŚ, D.; ADAMKIEWICZ, P. INDOOR LOCALIZATION SYSTEM USING UWB. **Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska**, 12, n. 1, p. 15-19, 03/31 2022. <https://doi.org/10.35784/iapgos.2895>

GOU, W.; YU, C.; WU, G. **Random Time-hopping Secure Ranging Strategy Against Distance-Reduction Attacks in UWB**. 2024. DOI: [10.48550/arXiv.2406.06252](https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.06252)

HAYWARD, S. J.; VAN LOPIK, K.; HINDE, C.; WEST, A. A. A Survey of Indoor Location Technologies, Techniques and Applications in Industry. **Internet of Things**, 20, p. 100608, 2022/11/01/ 2022. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100608>

HE, C.; WU, P.; HAN, L. Time of Arrival Estimation for Backscatter UWB. **IEEE Signal Processing Letters**, 31, p. 1124-1128, 2024. DOI: [10.1109/LSP.2024.3389467](https://doi.org/10.1109/LSP.2024.3389467)

HEYDARIAAN, M.; DABIRIAN, H.; GNAWALI, O., 2020, **AnguLoc: Concurrent Angle of Arrival Estimation for Indoor Localization with UWB Radios**. 112-119. DOI: [10.1109/DCOSS49796.2020.00028](https://doi.org/10.1109/DCOSS49796.2020.00028)

HUANG, S.-P.; CHEN, C.-B.; WEI, T.-Z.; TSAI, W.-T. *et al.* Range-Extension Algorithms and Strategies for TDOA Ultra-Wideband Positioning System. **Sensors**, v.23, n. 6, DOI: 10.3390/s23063088. <https://doi.org/10.3390/s23063088>

IEEE. IEEE Draft Standard for Low-Rate Wireless Networks Amendment: Enhanced High Rate Pulse (HRP) and Low Rate Pulse (LRP) Ultra Wide-Band (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques. **IEEE P802.15.4z/D06, March 2020**, p. 1-171, 2020.

JIA, J.; GUO, K.; LI, W.; YU, X. *et al.* Composite Filtering for UWB-Based Localization of Quadrotor UAV With Skewed Measurements and Uncertain Dynamics. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 71, p. 1-13, 2022. DOI: [10.1109/TIM.2022.3151934](https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3151934)

KABBINALE, A. R.; BANSAL, A.; GOPALAN, K. S., 2023, **Towards Next-generation Ultra-Wideband Technology**. 830-834. DOI: [10.1109/COMSNETS56262.2023.10041270](https://doi.org/10.1109/COMSNETS56262.2023.10041270)

KAO, P. Y.; CHANG, H. J.; TSENG, K. W.; CHEN, T. *et al.* VIUNet: Deep Visual-Inertial-UWB Fusion for Indoor UAV Localization. **IEEE Access**, 11, p. 61525-61534, 2023. DOI: [10.1109/ACCESS.2023.3279292](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3279292)

KULIKOV, R. S., 2018, **Integrated UWB/IMU system for high rate indoor navigation with cm-level accuracy**. 1-4. DOI: [10.1109/MWENT.2018.8337235](https://doi.org/10.1109/MWENT.2018.8337235)

KUMAR, V.; PANDYA, S.; MAKAVANA, R. **ULTRA WIDE BAND (UWB) COMMUNICATION & ITS APPLICATIONS**. 2015.

LAZZARI, F.; BUFFI, A.; NEPA, P.; LAZZARI, S. Numerical Investigation of an UWB Localization Technique for Unmanned Aerial Vehicles in Outdoor Scenarios. **IEEE Sensors Journal**, 17, n. 9, p. 2896-2903, 2017. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2684817>

LI, T.-y.; DUAN, F.-j.; LIANG, C.-j.; JIANG, J.-j. *et al.* A high-precision unmanned aerial vehicle positioning system based on ultra-wideband technology. **Measurement Science and Technology**, 32, n. 5, p. 055101, 2021/03/12 2021. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abdbd4>

LIU, F.; ZHANG, T.; CAO, P. **Asynchronous Integration of Communication and Localization Systems Using IR-UWB Signals**. 2021. DOI: [10.1109/MILCOM52596.2021.9652951](https://doi.org/10.1109/MILCOM52596.2021.9652951)

LIU, H.; ZHANG, J.; HE, Z.; LIN, S., 2022, **Research and Implementation of UWB Data Transmission Algorithm for UAV Formation Flight Control**. 405-408. DOI: [10.1109/AIIPCC57291.2022.00091](https://doi.org/10.1109/AIIPCC57291.2022.00091)

LOU, X.; ZHAO, Y., 2019, **High-Accuracy Positioning Algorithm Based on UWB**. 71-75. <https://doi.org/10.1109/AIAM48774.2019.00021>

MANZI, G.; FELIZIANI, M.; BEECKMAN, P. A.; DIJK, N. v. Coexistence Between Ultra-Wideband Radio and Narrow-Band Wireless LAN Communication Systems—Part I: Modeling and Measurement of UWB Radio Signals in Frequency and Time. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, 51, n. 2, p. 372-381, 2009. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2008.2011364>

MCEVOY, P.; JOHN, M.; CURTO, S.; AMMANN, M. J., 2008, **Group delay performance of ultra wideband monopole antennas for communication applications**. 377-380. <https://doi.org/10.1109/LAPC.2008.4516945>

MOHAMMADMORADI, H.; HEYDARIAAN, M.; GNAWALI, O. **UWB Physical Layer Adaptation for Best Ranging Performance within Application Constraints**. 2018. <https://doi.org/10.1145/3289100.3289120>

MOHAMMADMORADI, H.; HEYDARIAAN, M.; GNAWALI, O., 2019, **SRAC: Simultaneous Ranging and Communication in UWB Networks**. 9-16. <https://doi.org/10.1109/DCOSS.2019.00025>

MOLISCH, A. F. Ultra-Wide-Band Propagation Channels. **Proceedings of the IEEE**, 97, n. 2, p. 353-371, 2009. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2008836>

NGUYEN, T.-M.; ZAINI, A. H.; WANG, C.; GUO, K. *et al.*, 2019, Ithaca. **Robust Target-relative Localization with Ultra-Wideband Ranging and Communication**. Ithaca: Cornell University Library, arXiv.org. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8460844>

NGUYEN, T. M.; NGUYEN, T. H.; CAO, M.; QIU, Z. *et al.*, 2019, **Integrated UWB-Vision Approach for Autonomous Docking of UAVs in GPS-denied Environments**. 9603-9609. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8793851>

PAKISTAN, T. A Report on Ultra Wide Band (UWB) Application **Pakistan Telecommunication Authority**, 2012.

PASO, T.; NIEMELÄ, V.; HAAPOLA, J.; HÄMÄLÄINEN, M. *et al.* **Performance Evaluation of IEEE 802.15.4-2011 IR-UWB System with Enhanced Modulation Scheme**. 2015. DOI:[10.4108/eai.28-9-2015.2261507](https://doi.org/10.4108/eai.28-9-2015.2261507)

PASTRAV, A.; SIMEDRONI, R.; PALADE, T.; DOLEA, P. *et al.*, **Evaluation of UWB Transmissions in Highly Reflective Environments**. IEEE. 527-532. <https://doi.org/10.1109/COMM48946.2020.9142043>

PETROV, P.; SMITH, J. Analyzing Group Delay in Ultra-Wideband Antennas for Localization Applications. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, 68, n. 5, p. 3443-3452, 2020. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2963231>

QUERALTA, J. P. COLLABORATIVE AUTONOMY IN HETEROGENEOUS MULTI-ROBOT SYSTEMS. **ANNALES UNIVERSITATIS TURKUENSIS**, 2022. doctoral thesis.

QUERALTA, J. P.; ALMANSA, C. M.; SCHIANO, F.; FLOREANO, D. *et al.*, 2020, **UWB-based System for UAV Localization in GNSS-Denied Environments: Characterization and Dataset**. 4521-4528. <https://doi.org/10.1109/IROS45743.2020.9341042>

RAHMAN, M. R.; VENKATAKRISHNAN, S. B.; VOLAKIS, J. L. Experimental Demonstration of Interference Mitigation Using Ultra-Wideband Spreading. **IEEE Journal of Microwaves**, 3, n. 3, p. 994-1004, 2023. <https://doi.org/10.1109/JMW.2023.3257108>

SADOWSKI, S.; SPACHOS, P. RSSI-Based Indoor Localization With the Internet of Things. **IEEE Access**, 6, p. 30149-30161, 2018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2843325>

SARKAR, A.; SULTANA, S. Study on Ultra-Wideband (UWB) System and Its Applications. 01/05 2018.

SEDLACEK, P.; SLANINA, M.; MASEK, P., 2019, **An Overview of the IEEE 802.15.4z Standard its Comparison and to the Existing UWB Standards**. 1-6. <https://doi.org/10.1109/RADIOELEK.2019.8733537>

SHAH, S.; CHAIWONG, K.; KOVAVISARUCH, L. O.; KAEMARUNGSI, K. *et al.* Antenna Delay Calibration of UWB Nodes. **IEEE Access**, 9, p. 63294-63305, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3075448>

SHALABY, M. A.; COSSETTE, C. C.; FORBES, J. R.; NY, J. L., 2023, **Calibration and Uncertainty Characterization for Ultra-Wideband Two-Way-Ranging Measurements**. 4128-4134. <https://doi.org/10.1109/ICRA48891.2023.10160769>

SHEN, Y., 2022, **Applications of UWB Positioning Technology in Smart Home**. Atlantis Press. 874-883. Disponível em: https://doi.org/10.2991/978-2-494069-31-2_102.

SHULE, W.; ALMANSA, C. M.; QUERALTA, J. P.; ZOU, Z. *et al.*, 2020, English, **UWB-based localization for multi-UAV systems and collaborative heterogeneous multi-robot systems**. Elsevier B.V. 357-364. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.07.051>

SUN, B.; HUANG, R.; XIA, Y.; SHAO, Z. *et al.*, 2023, **Integrated Communication and Localization Design Based on UWB Technology for Underground Substations**. 535-540. <https://doi.org/10.1109/ICET58434.2023.10211552>

SUN, J.; XIE, B.; XIONG, W.; ZHANG, Q. *et al.* Posture algorithm for mobile robot based on ultrawide band. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, 19, n. 4, 2022. <https://doi.org/10.1177/17298806221115285>

SUWAN, S.; AIRPHAIBOON, S.; PROMWONG, S. Delay Time and Power Distribution of HB-UWB Transmission Based on Measurement Data. *In*: Biomedical Engineering International Conference, 2018, DOI: 10.1109/BMEICON.2018.8609965. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/BMEICON.2018.8609965>.

SWEDBERG, C. NFL Extends UWB Commitment with Zebra. 2023-02-27 2023.

TROJER, T.; SAYOUS, L. arduino-dw1000: biblioteca Arduino para Decawave DW1000. 2019.

VITAL, L. A. V.; RAMOS, D. C. Explorando a Banda Ultralarga (UWB) para Posicionamento e Transferência de Dados entre UAVs em Ambientes Cooperativos. **RevistaFT**, 29, n. 140. <https://doi.org/10.69849/revistaft/cl10202411281818>

VITAL, L. A. V.; RAMOS, D. C., 2025, **Simultaneous Localization and Communication Based on UWB for UAV Applications**. 1-6. <https://doi.org/10.1109/CROS66186.2025.11066140>

WU, P. Comparison between the Ultra-wide Band based indoor positioning technology and other technologies. **Journal of Physics: Conference Series**, 2187, n. 1, p. 012010, 2022/02/01 2022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2187/1/012010>

XIANJIA, Y.; QINGQING, L.; QUERALTA, J. P.; HEIKKONEN, J. *et al.*, 2021, English, **Cooperative UWB-based localization for outdoors positioning and navigation of UAVs aided by ground robots**. <https://doi.org/10.1109/ICAS49788.2021.9551177>

XU, Y.; SHMALIY, Y. S.; AHN, C. K.; SHEN, T. *et al.* Tightly Coupled Integration of INS and UWB Using Fixed-Lag Extended UFIR Smoothing for Quadrotor Localization. **IEEE Internet of Things Journal**, 8, n. 3, p. 1716-1727, 2021. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3015351>

YAN, J.; YANG, C.; FAN, W.; ZHENG, Y. *et al.* GNSS/UWB integrated positioning with robust Helmert variance component estimation. **Advances in Space Research**, 73, n. 5, p. 2532-2547, 2024/03/01/ 2024. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.12.020>

YANG, B.; YANG, E. A Survey on Radio Frequency based Precise Localisation Technology for UAV in GPS-denied Environment. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, 103, n. 3, p. 38, 2021/10/06 2021. <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01500-4>

YANG, B.; YANG, E.; YU, L.; LOELIGER, A. High-Precision UWB-Based Localisation for UAV in Extremely Confined Environments. **IEEE Sensors Journal**, 22, n. 1, p. 1020-1029, 2022. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3130724>

YANG, J.; LEE, S., 2023, **Ultrawideband coupled relative positioning algorithm applicable to flight controller for multidrone collaboration**. <https://doi.org/10.4218/etrij.2023-0128>

YU, X.; LI, Q.; JORGE PEÑA, Q.; HEIKKONEN, J. *et al.*, 2021, Ithaca. **Applications of UWB Networks and Positioning to Autonomous Robots and Industrial Systems**. Ithaca: Cornell University Library, arXiv.org. DOI:[10.1109/MECO52532.2021.9460266](https://doi.org/10.1109/MECO52532.2021.9460266)

ZHANG, Y.; DONG, L.; LUO, J.; LU, L. *et al.*, 2022, **Intelligent Inspection Method of Transmission Line Multi Rotor UAV Based on Lidar Technology**. 232-236.
<https://doi.org/10.1109/ICNISC57059.2022.00055>

ZHOU, T.; CHENG, Y., 2021, **Positioning Algorithm of UWB based on TDOA Technology in Indoor Environment**. 261-266.
<https://doi.org/10.1109/ITME53901.2021.00061>

ZHUANG, Y.; WANG, Q.; SHI, M.; CAO, P. *et al.* Low-Power Centimeter-Level Localization for Indoor Mobile Robots Based on Ensemble Kalman Smoother Using Received Signal Strength. **IEEE Internet of Things Journal**, 6, n. 4, p. 6513-6522, 2019. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2907707>

ZIKRUL HAKIEM, I.; SALLEHUDDIN MOHAMED, H. Indoor Positioning System Based on UWB Rapid Integration with Unity Cross-Platform Development Engine Through IoT. **Journal of Artificial Intelligence and Technology**, 4, n. 1, p. 74-81, 10/28 2023. <https://doi.org/10.37965/jait.2023.0365>