

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DA PLACA NODEMCU-BU01 EM MEDIÇÕES DE DISTÂNCIA POR ULTRA-WIDEBAND (UWB)

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF THE NODEMCU-BU01 BOARD IN ULTRA-WIDEBAND (UWB) DISTANCE MEASUREMENTS

**Paulo Henrique Eleuterio Falsetti¹, Rodolfo Henrique Raymundo Engelmann²,
Paulo Ricardo Ferreira Neves³, Edson Rodrigues da Cruz Filho⁴, João Vitor Pavan⁵,
Jéssica Monique de Toledo⁶, Marcello Wilson Perez Berto⁷ e Gustavo Voltani Von Atzingen⁸**

RESUMO

A tecnologia Ultra-Wideband (UWB) tem se consolidado como uma das soluções mais precisas para sistemas de localização em ambientes internos, especialmente em aplicações que exigem elevada resolução espacial, robustez a interferências e baixo consumo energético. Apesar do crescente interesse nessa tecnologia, a placa NodeMCU-BU01 ainda é pouco explorada na literatura, e seu desempenho em condições experimentais reais permanece insuficientemente documentado. Nesse contexto, este trabalho apresenta uma investigação experimental abrangente da capacidade de medição de distância e posicionamento da NodeMCU-BU01, utilizando o método *Two-Way Ranging* (TWR). Foram realizadas campanhas de medição em distâncias variando de 5 m a 50 m, considerando diferentes angulações entre âncoras e *tags*, orientações do módulo, quantidades de pacotes transmitidos e configurações com múltiplas âncoras. Os dados obtidos foram analisados por meio de métricas estatísticas, incluindo média, desvio padrão, erro médio absoluto (EMA) e amplitude interquartil, além da aplicação de testes de normalidade, permitindo uma avaliação detalhada da estabilidade e da confiabilidade das medições. Os resultados demonstram que a BU01 alcança erros inferiores a 17 cm em medições em linha de visada (LOS), apresentando desempenho comparável ao de transceptores DW1000 amplamente utilizados em sistemas UWB comerciais e acadêmicos. Além disso, nas estimativas de posição obtidas por trilateração com três âncoras, os erros variaram entre 0,32 m e 0,42 m, valores compatíveis com sistemas UWB de baixo custo. Assim, este estudo contribui para a caracterização experimental da performance da NodeMCU-BU01 e fornece subsídios técnicos relevantes para sua aplicação em sistemas de localização indoor.

Palavras-chave: banda ultralarga, posicionamento sem fio, medição tempo-de-voo, análise estatística de erros, ambientes internos.

1 Mestre em Física. Universidade Federal de São Carlos - Sorocaba - UFSCar | Quickium Ltda. E-mail: paulohefal7@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1908-0499>

2 Estudante de Engenharia de Computação. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP - Piracicaba | Quickium Ltda. E-mail: rodolfo.engelmann@aluno.ifsp.edu.br. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6859-1744>

3 Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia. Quickium Ltda. E-mail: pneves@quickium.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0912-5056>

4 Estudante de Engenharia de Computação. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP - Piracicaba | Quickium Ltda. E-mail: efilho@quickium.com.

5 Engenheiro Mecânico. Quickium Ltda. E-mail: jpavan@quickium.com

6 Estudante de Engenharia Elétrica. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP - Piracicaba | Quickium Ltda. E-mail: jtoledo@quickium.com

7 Tecnólogo em Análise e Desenvolvimento de Sistemas. Quickium Ltda. E-mail: mperes@quickium.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5717-1780>

8 Doutor em Engenharia de Alimentos. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP - Piracicaba. E-mail: gustavo.von.atzingen@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3249-6173>

ABSTRACT

Ultra-Wideband (UWB) technology has been increasingly recognized as one of the most accurate solutions for indoor localization systems, particularly in applications that require high spatial resolution, robustness to interference, and low power consumption. Despite this growing interest, the NodeMCU-BU01 board remains poorly explored in the literature, and its performance under real experimental conditions is still insufficiently documented. In this context, this work presents a comprehensive experimental investigation of the distance measurement and positioning capabilities of the NodeMCU-BU01 using the Two-Way Ranging (TWR) method. Measurement campaigns were conducted over distances ranging from 5 m to 50 m, considering different angular configurations between anchors and tags, module orientations, numbers of transmitted packets, and multi-anchor setups. The collected data were analyzed using statistical metrics such as mean, standard deviation, mean absolute error (MAE), and interquartile range, as well as normality tests, allowing a detailed assessment of measurement stability and reliability. The results demonstrate that the BU01 achieves distance errors below 17 cm under line-of-sight (LOS) conditions, exhibiting performance comparable to that of widely used DW1000 transceivers. Furthermore, position estimates obtained through trilateration with three anchors presented errors ranging from 0.32 m to 0.42 m, which are consistent with expectations for low-cost UWB systems. Overall, this study contributes to the experimental characterization of the NodeMCU-BU01 and provides relevant technical insights for its adoption in indoor localization systems.

Keywords: *ultra-wideband, wireless positioning, time-of-flight measurement, statistical error analysis, indoor environments.*

1 INTRODUÇÃO

O termo *Internet of Things* (IoT) foi cunhado em 1999 por Kevin Ashton (Mouha, 2021) e refere-se a um ecossistema no qual objetos físicos possuem representações virtuais conectadas à internet, permitindo a integração entre os mundos físico e digital. A IoT fundamenta-se na comunicação *machine-to-machine* (M2M), viabilizando a interação contínua entre dispositivos e aplicações em nuvem, a qualquer momento e local, com mínima ou nenhuma intervenção humana (Fan *et al.*, 2014; Meyer; Boll, 2014; Razzaque *et al.*, 2016; Yushi; Fei; Hui, 2012; Zhou *et al.*, 2019). Esse paradigma tem impulsionado a transformação de dispositivos vestíveis, portáteis e industriais em sistemas inteligentes capazes de coletar, processar e compartilhar dados em tempo real (Mouha, 2021).

Entre as diversas aplicações da IoT, aquelas que exigem localização precisa e rastreamento em tempo real, como automação industrial, robótica móvel e segurança operacional, têm recebido destaque crescente (Allioui; Mourdi, 2023). Sistemas tradicionais de posicionamento baseados em GNSS, como GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou, apresentam limitações significativas em ambientes internos devido à atenuação de sinais e erros métricos elevados (Samama, 2019). Essas restrições impulsionaram o desenvolvimento dos *Indoor Positioning Systems* (IPSs), *Real-Time Location Systems* (RTLs) e *Real-Time Tracking Systems* (RTTs), projetados para operar com alta precisão em ambientes fechados (Al-Okby *et al.*, 2024).

Dentre as tecnologias empregadas em IPSs, como Wi-Fi, BLE, RFID, visão computacional e ondas acústicas, a tecnologia de banda ultralarga ou *ultra-wideband* (UWB) destaca-se como uma das soluções mais promissoras para aplicações IoT que demandam exatidão centimétrica e baixa latência (Al-Okby *et al.*, 2024). A UWB opera em uma ampla faixa de frequências (3,1 a 10,6 GHz), transmitindo pulsos de curta duração e alta largura de banda, o que possibilita medições extremamente precisas do tempo de voo (*Time of Flight* - ToF). Essa característica confere à UWB elevada resolução temporal, maior robustez a interferências multipercurso e desempenho superior em comparação a tecnologias de radiofrequência de banda estreita (Al-Okby *et al.*, 2024; Qorvo, 2025).

Sistemas de posicionamento baseados em UWB são tipicamente compostos por dispositivos fixos (*anchors*) e móveis (*tags*), os quais interagem por meio de diferentes topologias, como *Two-Way Ranging* (TWR), *Time Difference of Arrival* (TDoA) e *Phase Difference of Arrival* (PDoA) (Al-Okby *et al.*, 2024). Essas abordagens permitem a estimação precisa de distâncias, ângulos e posições, sendo combinadas com técnicas de trilateração ou triangulação para a determinação espacial dos objetos. Além disso, a baixa potência de transmissão da UWB (-41,3 dBm) reduz interferências com outros sistemas, favorecendo sua adoção em ambientes industriais e científicos densamente instrumentados (Al-Okby *et al.*, 2024).

Diante desse contexto, o presente artigo teve como objetivo realizar medições de distância e trilaterações utilizando placas de desenvolvimento NodeMCU-BU01 (AI Thinker, 2020), explorando o potencial da tecnologia UWB como solução de alto desempenho para sistemas de posicionamento interno aplicados à Internet das Coisas.

Apesar dos avanços na tecnologia UWB, a placa NodeMCU-BU01 ainda é pouco explorada na literatura, especialmente no que se refere à sua avaliação experimental em condições reais de operação que considerem fatores como orientação, variação angular e configurações com múltiplas âncoras. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar experimentalmente o desempenho da placa NodeMCU-BU01 em medições de distância e posicionamento indoor utilizando tecnologia UWB. Para isso, realiza-se uma avaliação experimental sistemática sob múltiplas configurações, incluindo diferentes distâncias, ângulos, orientações e arranjos com múltiplas âncoras, bem como uma caracterização estatística dos erros de medição, contemplando sua robustez frente à presença de outliers, além de uma análise da acurácia de posicionamento por meio de trilateração em ambientes realistas.

2 METODOLOGIA

Nesta seção são apresentadas a metodologia estatística empregada na avaliação dos dados (“2.1. Metodologia estatística para avaliação dos dados”); o procedimento de medição da distância entre uma âncora e uma tag (sistema mais simples, com interação de apenas dois elementos),

destinado a caracterizar os limites de interação entre esses elementos (“2.2. Medidas de distância”); e o experimento de trilateração realizado com três âncoras e uma tag (“2.3. Trilateração”).

2.1 METODOLOGIA ESTATÍSTICA PARA AVALIAÇÃO DOS DADOS

Os dados coletados foram analisados com técnicas estatísticas tradicionais e avançadas. De maneira geral, a análise incluiu estatísticas descritivas, como média, mediana e desvio-padrão, e métricas relacionadas à forma da distribuição, especificamente a assimetria (skewness) e a curtose (kurtosis) (Faceli *et al.*, 2021). Para verificar a aderência dos dados à distribuição normal, utilizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov. O objetivo dessa análise foi caracterizar rigorosamente a distribuição dos valores registrados, identificar possíveis desvios da normalidade e apoiar a interpretação estatística das condições experimentais. Analisou-se a repetibilidade das medições por meio do desvio padrão amostral (σ), que pode ser obtido a partir da raiz quadrada do segundo momento central (variância), definido como (Faceli *et al.*, 2021):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x})^2}{n - 1}} \quad (1)$$

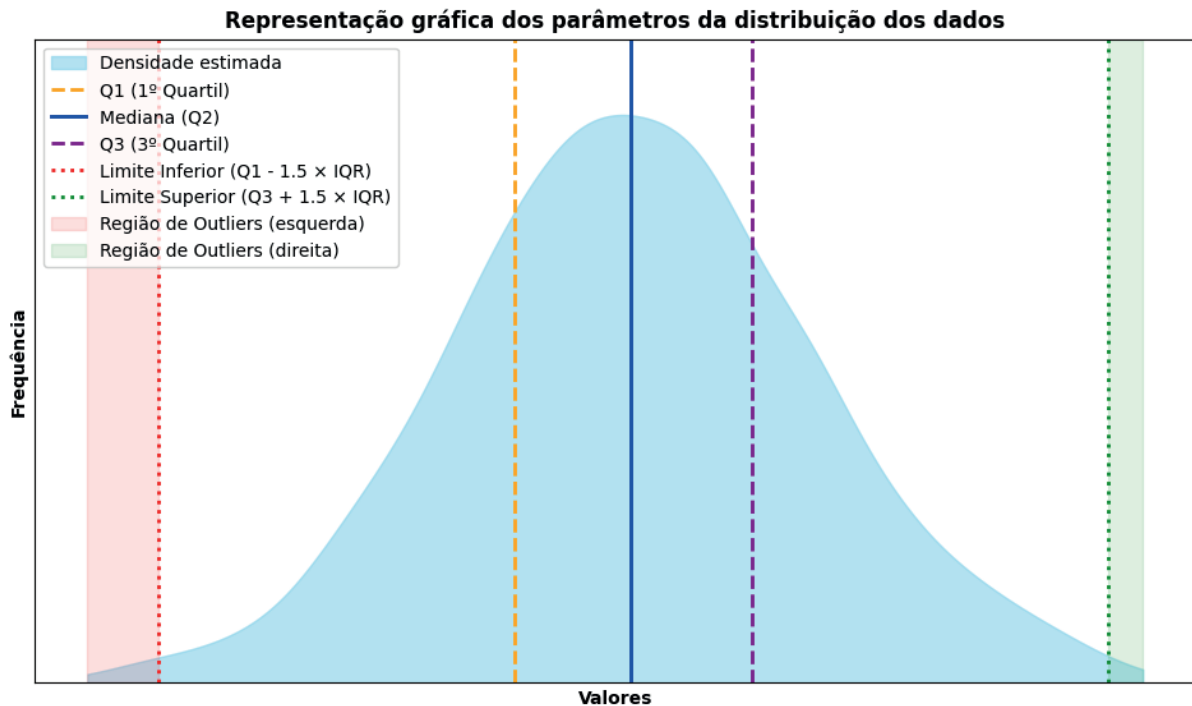
Em que x_i é o valor individual (ou medido) na i -ésima observação, o \hat{x} é a média do conjunto de dados e n é o número de dados da amostra. Também, os dados foram analisados em termos do erro médio absoluto (EMA), definido conforme a Equação (2) (Faceli *et al.*, 2021). A escolha dessa métrica deve-se ao fato de que o EMA fornece uma medida direta da magnitude média dos erros, sem considerar o sinal numérico, o que facilita a avaliação da precisão do modelo ou método em relação aos valores observados (Faceli *et al.*, 2021). A Equação do EMA é dada por (Faceli *et al.*, 2021):

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \hat{x}_i| \quad (2)$$

Em que n é o número total de dados, x_i é o valor real (referência) na i -ésima observação e o \hat{x}_i é o valor estimado na i -ésima observação.

Para tornar a análise mais consistente, foi necessário eliminar alguns *outliers* identificados com base no critério interquartil (IQR), utilizando a mediana dos dados como referência central, que define como discrepantes os valores que se encontram fora do intervalo entre $Q1 - 1,5 \times IQR$ e $Q3 + 1,5 \times IQR$, sendo $Q1$ o primeiro quartil, $Q3$ o terceiro quartil e IQR o intervalo interquartil ($IQR = Q3 - Q1$) (Faceli *et al.*, 2021). Neste caso, o fator 1,5 representa uma margem de tolerância adotada (Faceli *et al.*, 2021). A Figura 1 demonstra graficamente o critério de descarte dos dados.

Figura 1 - Representação esquemática do critério adotado para exclusão de outliers, com o objetivo de aprimorar a análise estatística dos dados



Fonte: Construção do Autor.

2.1.1 Assimetria

A assimetria (skewness) descreve o grau de desbalanceamento de uma distribuição em relação ao seu centro. Distribuições simétricas apresentam skewness igual a zero; valores positivos indicam cauda mais longa à direita e valores negativos indicam cauda mais longa à esquerda (Ghasemi; Zahediasl, 2012; Hatem *et al.*, 2022; Kim, 2013; Mishra *et al.*, 2019). A assimetria amostral foi calculada conforme a seguinte equação (Faceli *et al.*, 2021):

$$\text{Assimetria} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^3, \quad (3)$$

Em que x_i são os valores observados, μ é a média amostral, σ é o desvio-padrão e n é o tamanho da amostra.

2.1.2 Curtose

A curtose quantifica o nível de concentração de probabilidade nas caudas da distribuição. Foi utilizado o excesso de curtose, que assume valor zero para distribuições normais (Ghasemi; Zahediasl, 2012; Hatem *et al.*, 2022; Kim, 2013; Mishra *et al.*, 2019). A fórmula utilizada foi (Faceli *et al.*, 2021):

$$\text{Curtose} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^4 - 3. \quad (4)$$

Em que x_i são os valores observados, μ é a média amostral, σ é o desvio-padrão e n é o tamanho da amostra. Através de valores típicos, pode-se classificar as distribuições conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação das distribuições conforme os valores da Curtose.

Curtose	Classificação
≈ 0	Mesocúrtica (normal)
> 0	leptocúrtica
< 0	platicúrtica

Fonte: Construção do Autor.

2.1.3 Teste de normalidade

Existem diversos métodos disponíveis para avaliar a normalidade de dados contínuos (Mishra *et al.*, 2019). Entre eles, os dois testes mais amplamente utilizados são o teste de Kolmogorov-Smirnov e o teste de Shapiro-Wilk (Mishra *et al.*, 2019). No presente artigo, a normalidade dos dados foi avaliada por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S), um teste estatístico não paramétrico utilizado para verificar a aderência de uma amostra a uma distribuição teórica. O teste foi originalmente proposto por Kolmogorov em 1933 (Kolmogorov, 1933) e posteriormente estendido por Smirnov em 1948 (Smirnov, 1948), tornando-se um método amplamente empregado para a comparação entre distribuições empíricas e teóricas, incluindo a avaliação da normalidade dos dados (Das; Imon, 2016).

O teste baseia-se na comparação entre a função de distribuição empírica da amostra $F_n(x)$ e a função de distribuição cumulativa teórica $F(x, \mu, \sigma)$ da distribuição normal. Nesta formulação, x representa a variável aleatória associada aos valores observados na amostra, enquanto μ e σ denotam, respectivamente, a média e o desvio padrão da distribuição normal considerada. Quando os parâmetros populacionais são desconhecidos, como é o caso neste estudo, μ e σ são estimados a partir da própria amostra, utilizando-se a média amostral e o desvio padrão amostral. A estatística do teste é definida como (Das; Imon, 2016):

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x, \mu, \sigma)| \quad (5)$$

O teste de Kolmogorov-Smirnov baseia-se na estatística D, definida como a máxima diferença absoluta entre a função de distribuição empírica dos dados e a função de distribuição cumulativa teórica da distribuição normal. Valores elevados de D indicam maior discrepância entre as distribuições, sugerindo rejeição da hipótese de normalidade, enquanto valores menores indicam maior aderência dos dados ao modelo normal (Das; Imon, 2016). Para a verificação da normalidade, adotou-se como hipótese nula (Mishra *et al.*, 2019):

$$H_0: \text{Os dados seguem uma distribuição normal.} \quad (6)$$

A hipótese nula não foi rejeitada sempre que (Mishra *et al.*, 2019):

$$p > 0,05. \quad (7)$$

Quando os parâmetros populacionais e são desconhecidos, estimativas amostrais são utilizadas no cálculo da função de distribuição teórica. Nessas condições, o teste de Kolmogorov-Smirnov permanece amplamente aplicado, embora apresente limitações associadas à estimação dos parâmetros e à sensibilidade a valores extremos (Das; Imon, 2016; Ghasemi; Zahediasl, 2012).

Em estudos com grandes tamanhos amostrais ($n > 1000$), o teste de Kolmogorov-Smirnov é frequentemente empregado, uma vez que sua sensibilidade aumenta com o tamanho da amostra, possibilitando a detecção de pequenos desvios da normalidade (Mishra *et al.*, 2019). Entretanto, essa elevada sensibilidade pode levar à rejeição da hipótese nula mesmo quando as violações da normalidade são pouco relevantes do ponto de vista prático, motivo pelo qual os resultados devem ser interpretados em conjunto com análises gráficas e estatísticas descritivas (Ghasemi; Zahediasl, 2012; Mishra *et al.*, 2019).

2.2 MEDIDAS DE DISTÂNCIA

Inicialmente, foram realizadas medições de distância entre uma tag e uma âncora, com o objetivo de avaliar as limitações e o comportamento do sistema em sua configuração mais simples (apenas dois elementos interagindo). Para cada condição experimental, foi coletado um conjunto de aproximadamente 900 a 1200 medições, obtidas de forma contínua. Nos respectivos gráficos são apresentados o número de amostras, a taxa de aquisição e as principais grandezas estatísticas de cada condição. As medidas foram realizadas utilizando placas NodeMCU-BU01 (AI Thinker, 2020). No sistema de posicionamento interno, a placa NodeMCU-BU01 foi empregada tanto como tag quanto como

âncora. Essa placa incorpora um microcontrolador STM32F103C8T6 e o módulo BU01, um transceptor UWB (Ultra-Wideband) com antena integrada, com arquitetura baseada no chip Decawave DW1000, capaz de fornecer alta precisão de localização (erro de aproximadamente 10 cm) e suportar taxas de transmissão de até 6,8 Mbps (AI Thinker, 2020). A escolha da placa deve-se à sua eficácia em ambientes complexos e ao baixo custo em comparação com alternativas disponíveis no mercado (Niu *et al.*, 2023). Para a medição das distâncias entre âncoras e tags, adotou-se a topologia TWR (Two-Way Ranging) (Al-Okby *et al.*, 2024).

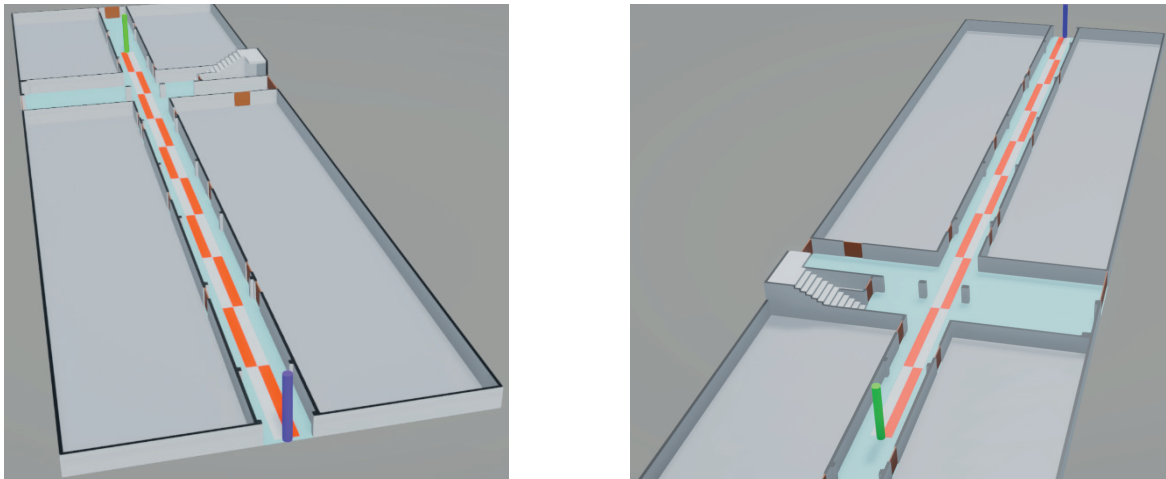
A programação foi desenvolvida em C++ por meio da plataforma Arduino IDE (versão 2.3.4). Como o módulo BU01 é baseado no DW1000, este oferece até 16 modos operacionais, os quais podem ser configurados conforme a necessidade do projeto. Neste trabalho, adotou-se canal de frequência em 6489,6 MHz com largura de banda de 1081,6 MHz, com o intuito de reduzir interferências com tecnologias como Wi-Fi (Al-Okby *et al.*, 2024) e aumentar a precisão das medidas (Decawave, 2017). Após a avaliação preliminar, foram selecionados uma taxa de transmissão de 110 kbps, um pulso de 16 MHz e um preâmbulo de 2048 símbolos. A configuração adotada foi selecionada visando priorizar estabilidade e confiabilidade das medições em detrimento da taxa de transmissão, em consonância com os requisitos de sistemas de posicionamento indoor baseados em UWB. Não foi aplicado nenhum procedimento adicional de calibração além da configuração padrão do módulo.

Os experimentos foram conduzidos em um corredor de 59,89 m × 2,26 m × 4,00 m (comprimento × largura × altura) de um dos prédios do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - Campus Piracicaba (IFSP-Piracicaba), cuja representação é apresentada na Figura 2. A âncora foi posicionada na origem (0 m) e distâncias conhecidas foram demarcadas no solo em incrementos de 5 m, até alcançar 50 m, que corresponde à distância máxima utilizada nas medições. Durante os experimentos, não houve movimentação significativa de pessoas no ambiente e nenhuma fonte adicional de interferência de radiofrequência foi intencionalmente introduzida.

Adicionalmente, investigou-se a influência da orientação da placa na qualidade das medições. Para esse fim, foram desenvolvidos suportes específicos que permitiram fixá-las em posição horizontal e vertical, conforme ilustrado na Figura 3 (a) e Figura 3 (b), respectivamente. Para padronização da altura, tanto a âncora quanto a tag foram fixadas a 1,70 m do solo utilizando tripés, conforme Figura 3 (c).

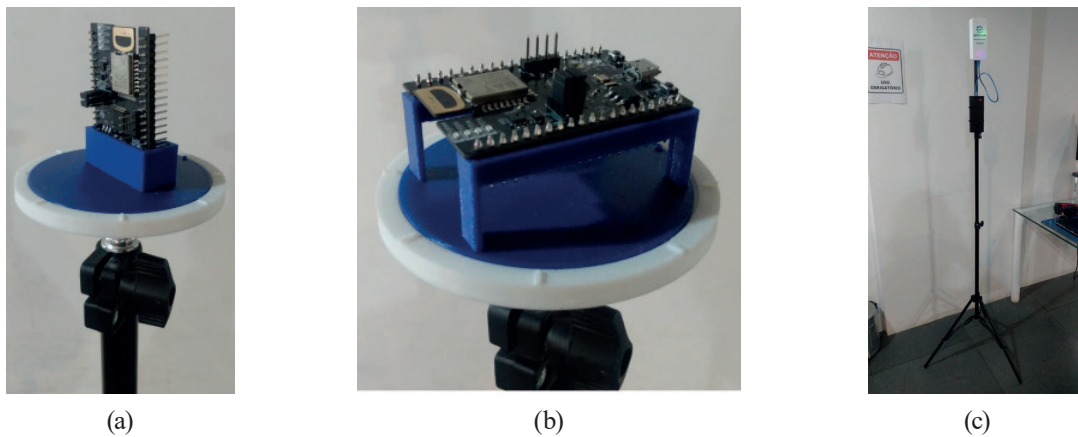
Vale ressaltar que todas as medições de distância foram realizadas em condições de linha de visada (LOS - Line of Sight), salvo indicação em contrário.

Figura 2 - Representação do ambiente experimental utilizado nas medidas de distâncias entre tag e âncora realizadas no IFSP - Piracicaba. A âncora foi instalada na origem do corredor (0 m, cilindro azul) e a tag posicionada a distâncias de até 50 m (cilindro verde), com incrementos regulares de 5 m ao longo do eixo longitudinal do corredor (escala em vermelho). O ambiente contém paredes (cinza) e portas (marrom) conforme ilustrado. A porta situada atrás da âncora permaneceu aberta durante as medições, a fim de reduzir interferências significativas decorrentes de reflexões que ocorreriam caso estivesse fechada. Para facilitar a visualização, a altura real das paredes e portas foi reduzida na representação. As medições foram realizadas na área hachurada em azul claro, cuja altura é de 4 m até a laje de concreto.



Fonte: Construção do Autor.

Figura 3 - Suportes para fixação da placa ao tripé nas posições horizontal (a) e vertical (b). Protótipo da âncora montada no tripé (c).



Fonte: Construção do Autor.

2.3 MEDIDAS DE INFLUÊNCIA ANGULAR

As medições de distância em função da angulação e da orientação espacial (horizontal ou vertical) foram realizadas considerando uma distância fixa de 25 metros, no mesmo local descrito na Seção 2.2 (Medidas de distância). Com o auxílio das marcações previamente estabelecidas nos suportes (Figura 3 (a) e (b)), foram efetuadas medições para diferentes ângulos relativos entre a tag e a âncora, especificamente 0° , 45° , 90° , 135° e 180° . Para garantir a padronização da altura durante

os ensaios, tanto a âncora quanto a tag foram fixadas a 1,70 m em relação ao solo, utilizando tripés, conforme ilustrado na Figura 3 (c).

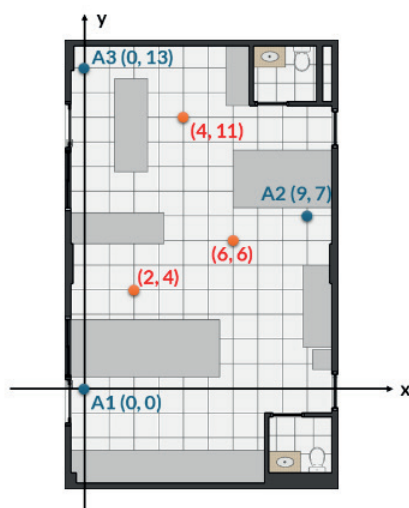
2.4 TRILATERAÇÃO

Os testes de trilateração foram conduzidos no escritório da empresa proponente (Quickium Tecnologia Ltda.). Em cada ambiente, três âncoras foram posicionadas em tripés a uma altura de 1,70 m, em pontos com coordenadas previamente conhecidas, conforme esquema na Figura 4.

As três distâncias resultantes entre tag-âncora foram processadas em um algoritmo de trilateração em Python, para calcular as coordenadas x e y da tag. As âncoras nos tripés (Figura 3 (c)) e a tag foram posicionadas na vertical (Figura 3 (b)).

A Figura 4 apresenta a planta baixa do ambiente de testes, com dimensões de $10,65 \times 6,32$ m, onde foram realizadas as medições de trilateração. As marcações do piso, com dimensões de 60×60 cm, foram utilizadas para definir a escala do plano cartesiano de referência, considerando cada quadrado do piso como uma unidade. Ressalta-se que o escritório contém diversos obstáculos que podem comprometer a aquisição e a precisão dos sinais, configurando, contudo, um ambiente experimental adequado para a realização de testes preliminares. Três âncoras foram posicionadas nas seguintes coordenadas: A1 (0, 0), A2 (9, 7) e A3 (0, 13). Foram coletadas as posições x e y da tag, posicionada nas coordenadas (2, 4), (6, 6) e (4, 11). A coleta de dados teve início apenas após o correto posicionamento da tag na posição de referência e a ativação do dispositivo. A cada mudança de posição, a tag foi desligada, reposicionada e ligada novamente, de modo a evitar qualquer interferência decorrente de sua movimentação enquanto ainda estava ativa.

Figura 4 - Planta baixa do escritório no qual foram realizadas as medidas de trilateração. Os limites dos pisos foram utilizados para demarcar o sistema cartesiano. Foram utilizadas três âncoras (A1, A2 e A3), pontos na cor azul, e uma tag que foi posicionada nos pontos (2, 4), (6, 6) e (4, 11), pontos na cor vermelha, para aquisição de medidas de posição.



Fonte: Construção do Autor.

Para o cálculo do desvio padrão nos eixos x e y , utilizou-se a Equação (1). Para o cálculo do erro médio absoluto (EMA), considerando as duas variáveis x e y , utilizou-se a seguinte equação:

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (7)$$

Em que n é o número total de dados; x_i é o valor real (referência) na i -ésima observação de x ; o \hat{x}_i é o valor medido (estimado) na i -ésima observação de x ; y_i é o valor real (referência) na i -ésima observação de y ; e o \hat{y}_i é o valor medido (estimado) na i -ésima observação de y .

3 RESULTADOS

3.1 MEDIDAS DE DISTÂNCIA

Após a remoção de outliers pelo critério IQR, observa-se uma pequena, porém relevante, redução no número de registros por grupo. A proporção de outliers varia, em geral, de 0% a 1,7%, sendo ligeiramente maior em ângulos extremos ou valores de referência elevados. As Tabelas 2 e 3 evidenciam que esses poucos valores atípicos exercem forte impacto sobre a média, inflando seus valores e reduzindo sua representatividade como medida central. Esses valores extremamente elevados são decorrentes de falhas esporádicas no processo de medição (ranging), que geram outliers com ordens de grandeza superiores à distância real.

Em contraste, a mediana mostra-se praticamente inalterada após a exclusão dos outliers, confirmando sua robustez frente a valores extremos e sua adequação para a caracterização do comportamento típico dos dados. A comparação entre as direções indica que, para valores de referência mais baixos, a média com outliers na direção vertical tende a ser superior à horizontal, sugerindo maior variabilidade nessa direção; para valores intermediários, essa diferença é menos sistemática, mas ainda perceptível.

Apesar da baixa taxa geral de outliers, inferior a 1% na maioria dos casos, observa-se aumento dessa proporção para valores de referência mais altos (45,0 e 50,0), exigindo cautela adicional na interpretação. Assim, os resultados reforçam a importância do uso de estatísticas robustas, como a mediana, e da análise comparativa com e sem outliers, bem como da consideração de possíveis influências direcionais na interpretação dos dados.

Tabela 2 - Resumo estatístico das medições de distância das placas na posição horizontal com e sem remoção de outliers.

Referência (m)	Média (com outliers) (m)	Mediana (com outliers) (m)	Total de dados	Total outliers	Taxa de outliers (dados / s)	Média (sem outliers) (m)	Mediana (sem outliers) (m)
5	45,53	5,41	942	1	0,11	5,40	5,41
10	10,05	10,05	1065	0	0,00	10,05	10,05
15	160,03	15,07	949	2	0,21	15,07	15,07
20	1.424,21	19,96	1085	2	0,18	19,96	19,96
25	43,87	24,9	1085	1	0,09	24,90	24,90
30	63,73	30,09	1095	1	0,09	30,09	30,09
35	35,16	35,16	932	4	0,43	35,16	35,16
40	63,94	39,95	1095	1	0,09	39,95	39,95
45	92,16	45,03	1164	1	0,09	45,03	45,03
50	161,32	50,23	1118	10	0,89	50,23	50,23

Fonte: Construção do Autor.

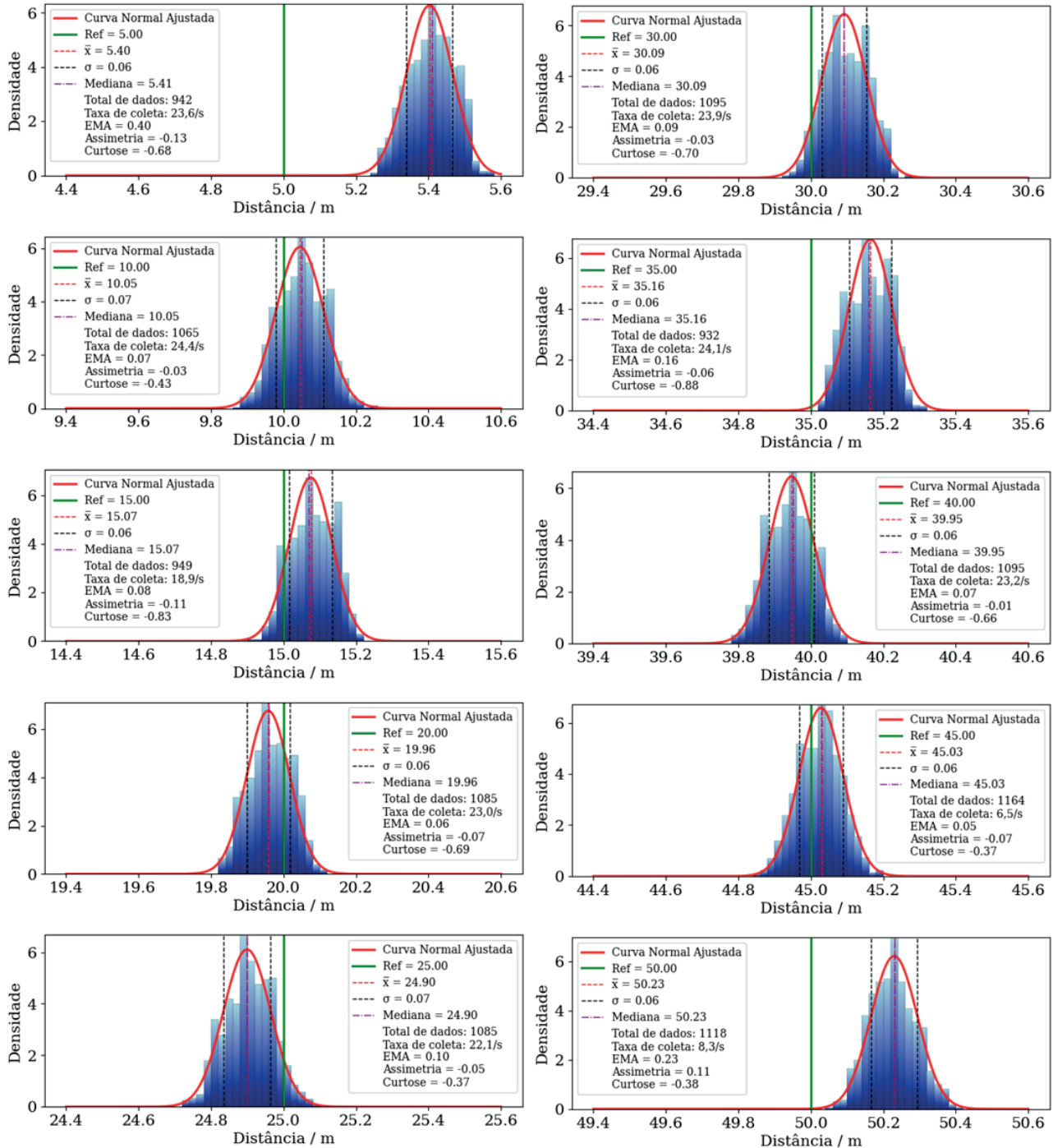
Tabela 3 - Resumo estatístico das medições de distância das placas na posição vertical com e sem remoção de outliers.

Referência (m)	Média (com outliers) (m)	Mediana (com outliers) (m)	Total de dados	Total outliers	Taxa de outliers (dados / s)	Média sem outliers (m)	Mediana sem outliers (m)
5	151,07	5,36	1081	2	0,19	5,36	5,36
10	202,65	10,17	1092	3	0,27	10,17	10,17
15	412,90	15,11	1078	6	0,56	15,11	15,11
20	64,99	20,08	1085	1	0,09	20,07	20,08
25	103,03	25,07	1090	2	0,18	25,06	25,07
30	45,85	30,14	947	3	0,32	30,14	30,14
35	35,08	35,09	907	2	0,22	35,08	35,09
40	90,01	40,14	1072	1	0,09	40,14	40,14
45	45,23	45,23	1161	11	0,95	45,23	45,22
50	144,41	50,32	976	3	0,31	50,32	50,32

Fonte: Construção do Autor.

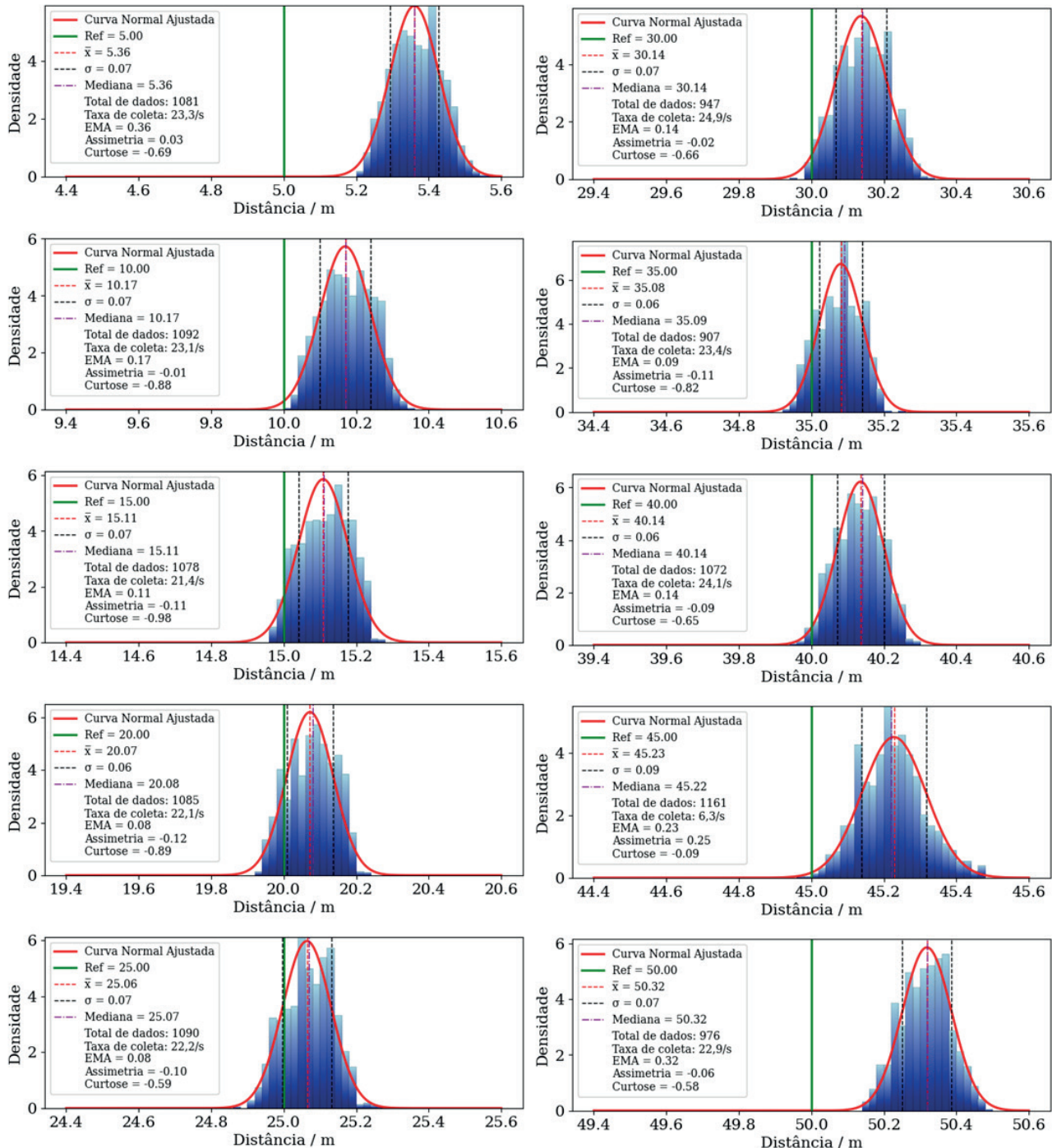
A análise estatística indica que as médias das medições permanecem próximas aos valores de referência, com pequenas variações associadas à dispersão natural do sensor. O desvio padrão (σ) é baixo, variando entre 0,059 e 0,088 (Figura 5 e Figura 6), evidenciando boa precisão do sistema. A taxa de aquisição de dados mantém-se estável entre 19 e 25 dados/s para distâncias de 5 a 40 m, em ambas as direções, indicando desempenho confiável e próximo do tempo real, com diferenças pouco significativas entre horizontal e vertical. Para distâncias superiores (45 - 50 m), observa-se queda acentuada da taxa, sobretudo na direção horizontal (6,5-8,3 dados/s), sugerindo que o limite operacional confiável do sistema situa-se em torno de 40 m, possivelmente devido a limitações do sensor, perda de sincronização ou interferências físicas. De forma geral, os dados apresentam alta consistência, baixa dispersão e poucas medições discrepantes. A remoção de outliers contribui para um conjunto de dados mais representativo e confiável, fortalecendo a robustez das análises subsequentes.

Figura 5 - Gráficos das medições de distância realizadas com as placas posicionadas horizontalmente, comparando os valores obtidos com os valores de referência (representados pela linha tracejada verde), destacando a média das medições (indicado pela linha tracejada vermelha), o desvio padrão (representado pelas linhas tracejadas pretas) e a mediana (indicada pela linha na cor “vinho”, ponto e vírgula). A legenda apresenta o número de dados coletados, a taxa de coleta e o EMA.



Fonte: Construção do Autor.

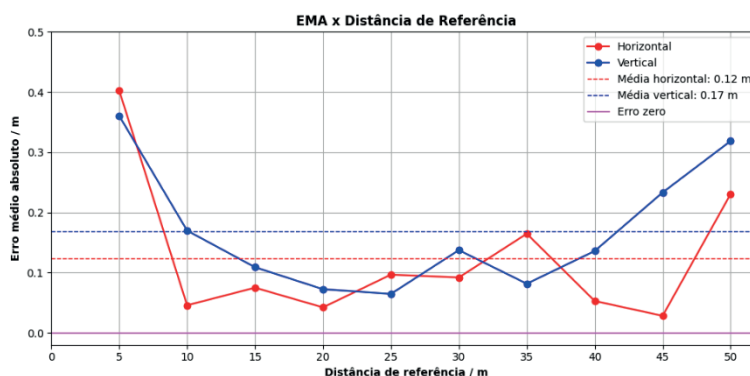
Figura 6 - Gráficos das medições de distância realizadas com as placas posicionadas verticalmente, comparando os valores obtidos com os valores de referência (representados pela linha tracejada verde), destacando a média das medições (indicado pela linha tracejada vermelha), o desvio padrão (representado pelas linhas tracejadas pretas) e a mediana (indicada pela linha na cor “vinho”, ponto e vírgula). A legenda apresenta o número de dados coletados, a taxa de coleta e o EMA.



Fonte: Construção do Autor.

A análise dos erros absolutos médios (EMA) revela diferenças sutis entre as direções horizontal e vertical (Figura 7). O EMA médio foi de aproximadamente 0,12 m na horizontal e 0,17 m na vertical, indicando ligeira superioridade da configuração horizontal em termos de precisão. Em curtas distâncias (5 m), os erros são relativamente elevados em ambas as direções (0,40 m na horizontal e 0,36 m na vertical), sugerindo maior sensibilidade a desvios sistemáticos ou limitações de calibração inicial. Entre 10 e 30 m, os erros permanecem baixos e estáveis, variando de 0,04 a 0,14 m, o que evidencia boa consistência do método nessa faixa. Para distâncias maiores (35 - 50 m), observa-se aumento gradual dos erros, mais pronunciado na direção vertical, que atinge até 0,32 m em 50 m, possivelmente devido a efeitos de propagação do sinal ou à geometria da trilateração. Assim, embora ambas as direções apresentem desempenho satisfatório, a horizontal mostra-se ligeiramente mais estável e precisa ao longo de toda a faixa analisada.

Figura 7 - Erros médio absoluto (EMA) das medidas de distâncias em função da distância de referência usada para medida.



Fonte: Construção do Autor.

Embora os histogramas e as estatísticas descritivas indiquem distribuições aproximadamente simétricas, com médias e medianas muito próximas e baixos valores de assimetria, o teste de Kolmogorov-Smirnov rejeitou a hipótese de normalidade para a maioria dos grupos analisados, conforme Tabela 4. Esse resultado está diretamente associado ao grande tamanho amostral ($n > 900$), que aumenta substancialmente a sensibilidade do teste, tornando-o capaz de detectar desvios sutis em relação à distribuição normal teórica. Em particular, observou-se curtose consistentemente negativa, indicando distribuições ligeiramente mais achatadas que a normal, característica suficiente para gerar diferenças estatisticamente significativas entre a função de distribuição empírica e a função de distribuição normal ajustada. Nesses contextos, a rejeição da hipótese nula pelo teste de Kolmogorov-Smirnov deve ser interpretada com cautela, uma vez que tais desvios, embora estatisticamente detectáveis, são de pequena magnitude e não comprometem necessariamente a adequação da aproximação normal para fins analíticos ou inferenciais, especialmente em aplicações práticas com grandes volumes de dados.

Tabela 4 - Resumo das grandezas estatísticas das medidas de distância.

Distância (m)	Direção	n	\bar{x}	σ	Assimetria	Curtose	p-valor (K-S)	Normalidade
5	Horizontal	939	5,40	0,06	-0,134	-0,677	0,0048	Não
5	Vertical	1079	5,36	0,07	0,035	-0,686	0,0002	Não
10	Horizontal	1062	10,05	0,07	-0,033	-0,430	0,0072	Não
10	Vertical	1089	10,17	0,07	-0,015	-0,884	0,0006	Não
15	Horizontal	947	15,08	0,06	-0,114	-0,831	0,0002	Não
15	Vertical	1072	15,11	0,07	-0,111	-0,980	0,001	Não
20	Horizontal	1082	19,96	0,06	-0,071	-0,695	0,001	Não
20	Vertical	1084	20,07	0,06	-0,119	-0,894	0,0002	Não
25	Horizontal	1064	24,90	0,07	-0,049	-0,375	0,0107	Não
25	Vertical	1087	25,06	0,07	-0,105	-0,590	0,001	Não
30	Horizontal	1094	30,09	0,06	-0,027	-0,700	0,001	Não
30	Vertical	945	30,14	0,07	-0,024	-0,659	0,0076	Não
35	Horizontal	931	35,16	0,06	-0,063	-0,879	0,001	Não
35	Vertical	906	35,08	0,06	-0,108	-0,824	0,0002	Não
40	Horizontal	1091	39,95	0,06	-0,015	-0,657	0,0007	Não
40	Vertical	1069	40,14	0,06	-0,094	-0,648	0,001	Não
45	Horizontal	1161	45,03	0,06	-0,072	-0,369	0,0012	Não
45	Vertical	1139	45,23	0,09	0,254	-0,095	0,0541	Não
50	Horizontal	1102	50,23	0,06	0,114	-0,381	0,0091	Não
50	Vertical	970	50,32	0,07	-0,064	-0,585	0,0026	Não

Fonte: Construção do Autor.

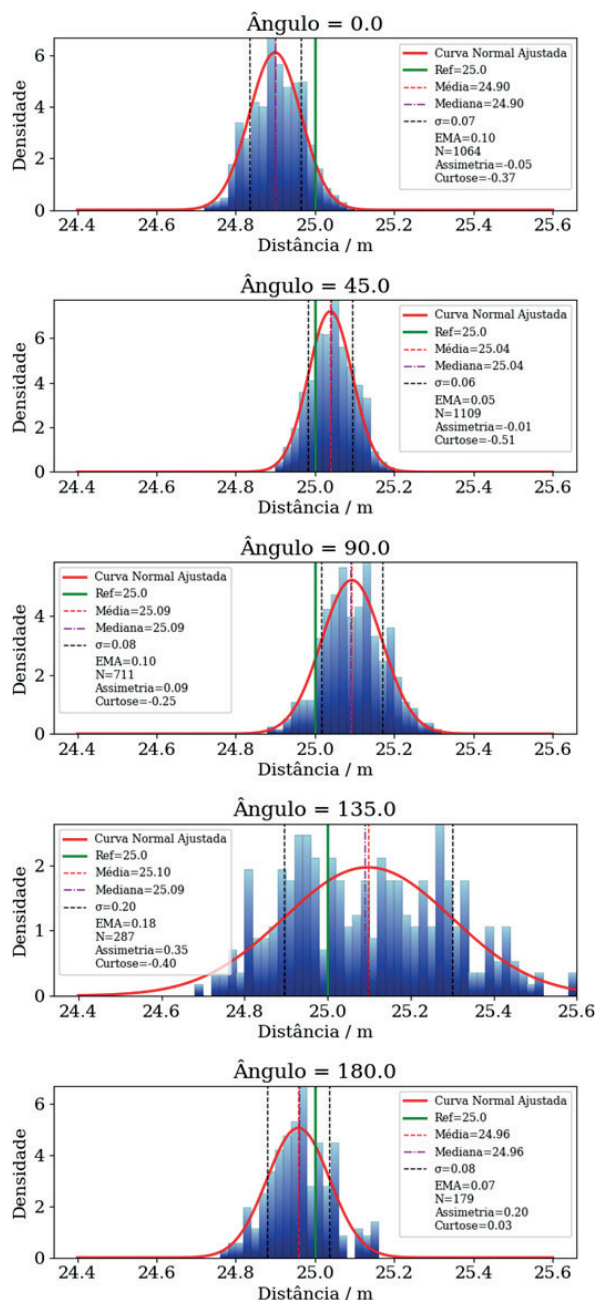
Conforme mencionado na metodologia, os resultados apresentados nesta seção baseiam-se na coleta de 900 a 1200 medições por condição experimental. Esse volume amostral foi definido com base na Lei dos Grandes Números: considerando o desvio padrão típico do sensor (aproximadamente 0,06 m), o erro da média amostral é dado por σ / \sqrt{n} (TAYLOR, 2012). Com $n = 900$, esse erro é reduzido para aproximadamente 2 mm, valor significativamente inferior à acurácia nominal do sistema (erro absoluto de aproximadamente 0,17 m). Assim, a média calculada representa o valor real da distância com erro desprezível, assegurando a reprodutibilidade e a precisão estatística dos resultados.

3.2 MEDIDAS DE INFLUÊNCIA ANGULAR

Foram analisadas medições de distância do sensor UWB para diferentes ângulos (0° , 45° , 90° , 135° e 180°) e direções (horizontal e vertical), conforme Figuras 8 e 9. Os outliers representaram apenas 0,5% a 2,5% dos dados, indicando boa consistência das medições. As estatísticas descritivas mostram médias e medianas próximas ao valor de referência (25 m), com baixos desvios padrão (0,055 - 0,078 m) na maioria dos casos, exceto por maior dispersão em alguns ângulos extremos na direção horizontal. O erro médio absoluto (EMA) variou entre 0,05 e 0,26 m, sendo menor nos ângulos centrais (0° - 90°) e maior nos extremos, evidenciando limitações do sensor nessas configurações.

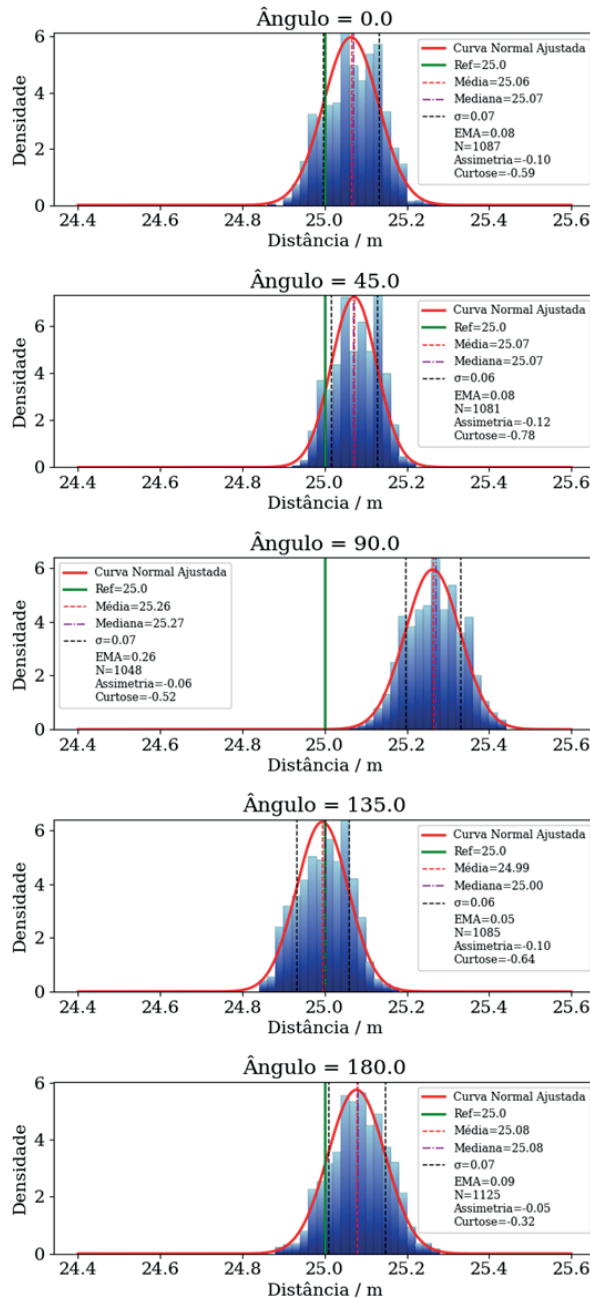
O desempenho médio entre direções foi semelhante (EMA médio de 0,10 m na horizontal e 0,11 m na vertical), porém a horizontal apresentou maior estabilidade, enquanto a vertical exibiu maior variabilidade, com destaque para o pico de erro em 90° (0,26 m), possivelmente associado a reflexões ou atenuações do ambiente. De forma geral, o sensor UWB apresentou medições confiáveis em todas as condições avaliadas, com melhor precisão nos ângulos centrais e maior estabilidade na direção horizontal, recomendando-se cautela na análise de ângulos extremos.

Figura 8 - Gráficos das medições de distância para diferentes ângulos realizadas com as placas posicionadas horizontalmente, comparando os valores obtidos com os valores de referência (representados pela linha tracejada verde), destacando a média das medições (indicado pela linha tracejada vermelha) e o desvio padrão (representado pela linha tracejada preta). A legenda apresenta o número de dados coletados, a taxa de coleta e o erro médio, definido como a diferença entre o valor médio das medições e a distância real.



Fonte: Construção do Autor.

Figura 9 - Gráficos das medições de distância para diferentes ângulos realizadas com as placas posicionadas verticalmente, comparando os valores obtidos com os valores de referência (representados pela linha tracejada verde), destacando a média das medições (indicado pela linha tracejada vermelha) e o desvio padrão (representado pela linha tracejada preta). A legenda apresenta o número de dados coletados, a taxa de coleta e o erro médio, definido como a diferença entre o valor médio das medições e a distância real.

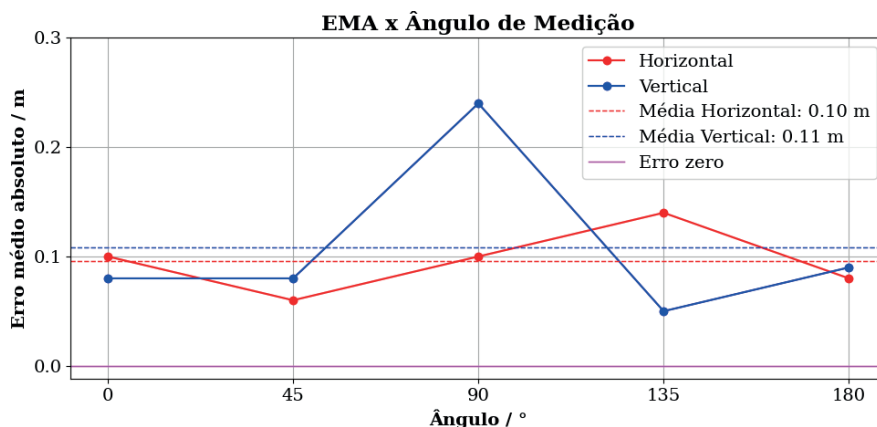


Fonte: Construção do Autor.

A análise do erro médio absoluto (EMA) em função do ângulo revela diferenças discretas entre as direções horizontal e vertical. O EMA médio foi de 0,10 m na horizontal e 0,11 m na vertical, indicando desempenho global semelhante. Pontualmente, em 0° e 90° o erro horizontal é de 0,10 m, enquanto o vertical é ligeiramente menor em 0° (0,08 m) e significativamente maior em 90° (0,24 m), sugerindo maior sensibilidade nessa orientação, possivelmente associada a reflexões ou atenuações

impostas pela geometria do ambiente. Em 135° , o erro vertical atinge seu menor valor (0,05 m), superando a precisão da horizontal (0,14 m). Já em 45° e 180° , os erros em ambas as direções permanecem próximos e inferiores a 0,10 m, indicando boa consistência nessas configurações.

Figura 10 - Erros médio absoluto (EMA) das medidas de distâncias para diferentes ângulos em função da distância de referência usada para medida.



Fonte: Construção do Autor.

As Tabelas 5 e 6 apresentam estatísticas descritivas que evidenciam o impacto dos outliers nas medições para o valor de referência de 25,0, considerando diferentes ângulos e as direções horizontal e vertical. Observa-se discrepância relevante entre as médias com e sem outliers, indicando forte influência de valores extremos sobre a média, especialmente em combinações específicas de ângulo e direção. Na direção horizontal, a média com outliers é sistematicamente superior à média sem outliers em todos os ângulos, com efeito particularmente acentuado em 0° e 180° , onde os valores chegam a ser mais de quatro vezes maiores, evidenciando alta sensibilidade da média à presença de dados extremos. Na direção vertical, o comportamento é mais dependente do ângulo: enquanto em 0° , 45° e 180° a influência dos outliers é limitada, em 90° observa-se dispersão anormal, com média extremamente elevada (89,24 m) e taxa de outliers de aproximadamente 16,5%, indicando forte distorção estatística nessa condição.

Em contraste, a mediana mantém-se estável antes e após a remoção dos outliers na maioria dos casos, confirmando sua robustez como medida representativa do comportamento típico dos dados. A taxa de outliers varia significativamente com ângulo e direção, sendo especialmente elevada em 90° e 135° na horizontal e, de forma mais crítica, em 90° na vertical, o que demanda o uso de métricas robustas ou tratamento estatístico específico. Essas variações podem estar associadas à diretividade da antena e à orientação dos dispositivos. Enquanto antenas omnidirecionais são mais adequadas para tags móveis, garantindo cobertura uniforme, antenas direcionais em âncoras fixas podem otimizar o ganho e reduzir interferências quando corretamente orientadas, especialmente em configurações limitadas a 180° (Qorvo, 2024).

Em síntese, os resultados reforçam a importância de considerar simultaneamente ângulo, direção e influência dos outliers na interpretação dos dados, uma vez que esses fatores afetam diretamente a confiabilidade das médias e a compreensão do desempenho global do sistema.

Tabela 5 - Medições de distância realizadas para diversos ângulos, com referência de 25 metros, utilizando placas em posição horizontal.

Ângulo	Média (com outliers) (m)	Mediana (com outliers) (m)	Total de dados	Total outliers	Taxa de outliers (dados / s)	Média (sem outliers) (m)	Mediana (sem outliers) (m)
0	43,87	24,9	1085	19	1,75	24,91	24,9
45	116,18	25,04	1118	7	0,63	25,04	25,04
90	110,52	25,09	722	11	1,52	25,09	25,09
135	108,39	25,09	292	44	15,07	25,06	25,055
180	276,41	24,96	190	7	3,68	24,97	24,96

Fonte: Construção do Autor.

Tabela 6 - Medições de distância realizadas para diversos ângulos, com referência de 25 metros, utilizando placas em posição vertical.

Ângulo	Média (com outliers) (m)	Mediana (com outliers) (m)	Total de dados	Total outliers	Taxa de outliers (dados / s)	Média (sem outliers) (m)	Mediana (sem outliers) (m)
0	103,03	25,07	1090	2	0,18	25,06	25,07
45	175,91	25,07	1082	1	0,09	25,07	25,07
90	89,24	25,27	1052	174	16,54	25,24	25,25
135	24,99	25	1086	0	0,00	24,99	25
180	32,24	25,08	1136	5	0,44	25,08	25,08

Fonte: Construção do Autor.

De forma geral, pode-se concluir que a direção horizontal apresenta comportamento mais regular, com erros entre 0,06 m e 0,14 m. Também, pode-se dizer que a direção vertical apresenta maior variabilidade, indo de 0,05 m até 0,24 m, com valores mínimos melhores que os horizontais, mas também piores nos casos extremos. Assim, embora o desempenho médio das duas direções seja muito próximo, a horizontal tende a ser mais estável, enquanto a vertical mostra maior sensibilidade ao ângulo relativo.

Tabela 7 - Resumo das grandezas estatísticas das medidas para verificar influência angular.

Distância (m)	Direção	n	\bar{x}	σ	Assimetria	Curtose	p-valor (K-S)	Normalidade
0	Horizontal	1064	24,90	0,07	-0,0486	-0,3745	0,0107	Não
0	Vertical	1087	25,06	0,07	-0,1045	-0,5895	0,0000	Não
45	Horizontal	1109	25,04	0,06	-0,0100	-0,5083	0,0106	Não
45	Vertical	1081	25,07	0,06	-0,1168	-0,7822	0,0000	Não
90	Horizontal	711	25,09	0,08	0,0868	-0,2483	0,0238	Não
90	Vertical	1048	25,26	0,07	-0,0643	-0,5172	0,0074	Não
135	Horizontal	287	25,10	0,20	0,3483	-0,4035	0,0469	Não
135	Vertical	1085	25,00	0,06	-0,1038	-0,6436	0,0000	Não
180	Horizontal	179	24,96	0,08	0,1978	0,0321	0,4176	Sim
180	Vertical	1125	25,08	0,07	-0,0528	-0,3200	0,0223	Não

Fonte: Construção do Autor.

A análise da assimetria, curtose e normalidade das medições de distância, considerando diferentes ângulos e as direções horizontal e vertical (Tabela 7), permite caracterizar o comportamento estatístico das distribuições. De modo geral, os coeficientes de assimetria apresentam baixa magnitude e valores próximos de zero, indicando distribuições aproximadamente simétricas, sem caudas pronunciadas em nenhuma das direções.

A curtose é predominantemente negativa, caracterizando distribuições platicúrticas, com menor concentração de dados em torno da média e caudas menos acentuadas que a distribuição normal. Esse comportamento é mais evidente nas medições verticais, que exibem valores de curtose mais negativos, sugerindo maior dispersão relativa. A exceção ocorre na condição horizontal a 180° , cuja curtose próxima de zero indica forma bastante semelhante à normal.

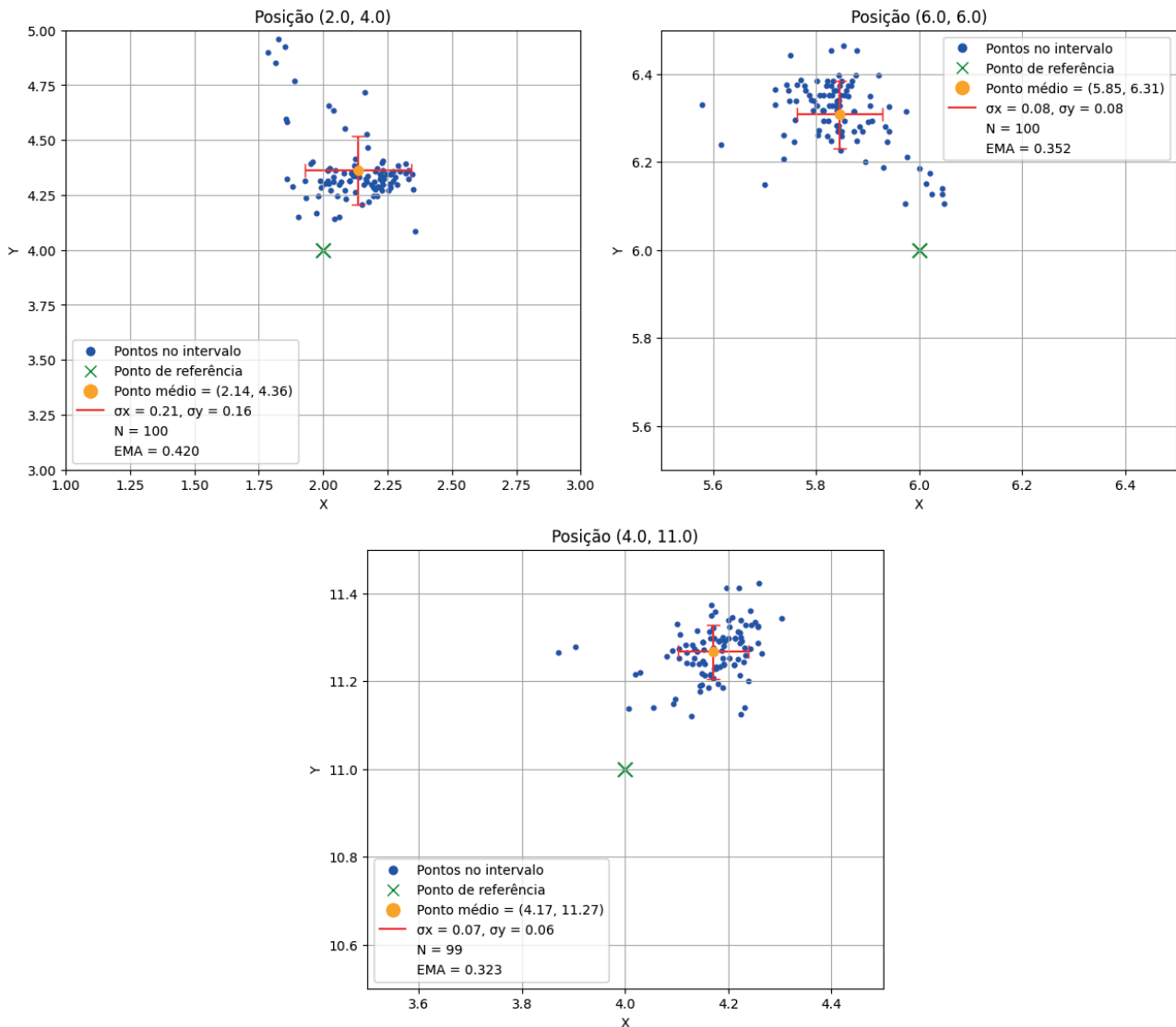
O teste de Kolmogorov-Smirnov rejeita a hipótese de normalidade na maioria dos casos ($p < 0,05$), mesmo quando assimetria e curtose indicam apenas desvios sutis. Tal resultado é coerente com o grande tamanho amostral, uma vez que testes de normalidade são altamente sensíveis em amostras extensas. A única condição em que a normalidade não é rejeitada corresponde à medição horizontal a 180° , que também apresenta o menor tamanho amostral, reduzindo o poder do teste.

Em síntese, embora os testes formais indiquem não normalidade para a maioria das distribuições, os baixos valores de assimetria e a curtose moderadamente negativa sugerem comportamento próximo ao normal, com desvios atribuíveis principalmente à sensibilidade estatística do teste e não a alterações estruturais relevantes nas distribuições.

3.3 TRILATERAÇÃO

As medições de posição por trilateração apresentaram boa consistência, com pontos médios próximos aos valores de referência. Os desvios padrão em x e y variaram entre aproximadamente 0,06 m e 0,21 m, indicando adequada concentração dos dados, enquanto o Erro Médio Absoluto (EMA) situou-se entre 0,32 m e 0,42 m, confirmando proximidade geral às posições de referência, apesar da presença de pequenas discrepâncias sistemáticas. A taxa de aquisição, entre 1 e 1,6 dados/s, mostrou-se suficiente para análises estatísticas confiáveis, embora revele limitações para aplicações que demandam atualização quase em tempo real. De forma geral, o sistema apresenta desempenho consistente e confiável, com erros dentro de limites aceitáveis, mas pode ser aprimorado por técnicas complementares, como filtros de Kalman ou métodos de aprendizado de máquina, especialmente em cenários NLOS (*Non Line of Sight*), a fim de reduzir erros sistemáticos e aumentar a robustez das estimativas.

Figura 11 - Medidas de posição (x, y) de tag posicionada em diferentes posições de referências: (2, 4); (6, 6); e (4, 11).



Fonte: Construção do Autor.

4 CONCLUSÃO

Os resultados das medições de distância e da análise angular indicam que, nas condições experimentais adotadas, a orientação da placa não exerceu influência significativa sobre a acurácia e a precisão das medições. Esse desempenho pode ser atribuído aos parâmetros de operação selecionados, que priorizam alcance e confiabilidade, à altura padronizada de instalação (1,70 m), à ausência de obstáculos relevantes e à característica quasi-omnidirecional da antena interna do módulo DW1000, fatores que contribuíram para a estabilidade do sinal.

Em curtas distâncias, observou-se maior variabilidade nas medições, evidenciando a necessidade de calibração específica e da aplicação de técnicas de filtragem, especialmente em sistemas de posicionamento por trilateração. Para diferentes ângulos, em particular na distância de referência

de 25 m, a orientação horizontal apresentou erro médio absoluto ligeiramente inferior ao da vertical, possivelmente devido a efeitos geométricos e ambientais, como maior suscetibilidade ao multipercursos nesta última.

A análise estatística destacou a influência de outliers, que em condições específicas elevaram significativamente a média das medições, sobretudo nas orientações horizontal (0° e 180°) e vertical (90°). Em alguns casos, a média com outliers superou em mais de quatro vezes a média sem esses valores extremos, reforçando a importância do uso de métricas robustas, como a mediana, e da aplicação criteriosa de filtros. A estabilidade da mediana, mesmo em cenários com elevada taxa de outliers, confirma sua adequação como medida representativa.

O sistema NodeMCU BU01 com UWB apresentou desempenho promissor, com erro médio absoluto inferior a 0,17 m em ambas as orientações. Apesar de maior instabilidade pontual na orientação horizontal próxima a 90° , o comportamento geral foi consistente ao longo dos ângulos analisados. As medições de posição por trilateração também mostraram boa consistência, com desvios padrão entre 0,06 m e 0,21 m e EMA entre 0,32 m e 0,42 m, além de taxa de aquisição entre 1 e 1,6 amostras/s, adequada para análise estatística, embora limitada para aplicações quase em tempo real.

Em síntese, os resultados confirmam a viabilidade do sistema UWB para aplicações de posicionamento em ambientes controlados, mesmo com variações na orientação do dispositivo. A necessidade de calibração adequada e a consideração dos fatores geométricos e ambientais permanecem essenciais, sobretudo em cenários internos e NLOS; ainda assim, a baixa sensibilidade à orientação constitui uma vantagem prática relevante para aplicações reais.

REFERÊNCIAS

- AI THINKER. **NodeMCU-BU01 Specification**. , 20 maio 2020. Disponível em: https://docs.ai-thinker.com/_media/nodemcu-bu01_product_specification_en_v1.0.pdf. Acesso em: 11 abr. 2025
- ALLIOUI, Hanane; MOURDI, Youssef. Exploring the Full Potentials of IoT for Better Financial Growth and Stability: A Comprehensive Survey. *Sensors*, v. 23, n. 19, p. 8015, jan. 2023.
- AL-OKBY, Mohammed Faeik Ruzajj *et al.* UWB-Based Real-Time Indoor Positioning Systems: A Comprehensive Review. *Applied Sciences*, v. 14, n. 23, p. 11005, 26 nov. 2024.
- DAS, Keya Rani; IMON, AHMR. A brief review of tests for normality. *American Journal of Theoretical and Applied Statistics*, v. 5, n. 1, p. 5-12, 2016.
- DECAWAVE. **DW1000 - Qorvo - Product Data Sheet**. Disponível em: <https://www.qorvo.com/products/p/DW1000#documents>. Acesso em: 11 abr. 2025.
- FACELI, Katti *et al.* Inteligência artificial: uma abordagem de aprendizado de máquina. 2021.

FAN, Yuan Jie *et al.* IoT-Based Smart Rehabilitation System. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 10, n. 2, p. 1568-1577, maio 2014.

GHASEMI, Asghar; ZAHEDIASL, Saleh. Normality tests for statistical analysis: a guide for non-statisticians. **International journal of endocrinology and metabolism**, v. 10, n. 2, p. 486, 2012.

HATEM, Georges *et al.* Normality testing methods and the importance of skewness and kurtosis in statistical analysis. **BAU Journal-Science and Technology**, v. 3, n. 2, p. 7, 2022.

KIM, Hae-Young. Statistical notes for clinical researchers: assessing normal distribution (2) using skewness and kurtosis. **Restorative dentistry & endodontics**, v. 38, n. 1, p. 52, 2013.

KOLMOGOROV, Andrei. Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione. **Giorn Dell'inst Ital Degli Att**, v. 4, p. 89-91, 1933.

MEYER, Jochen; BOLL, Susanne. Smart health systems for personal health action plans. *In*: 2014 IEEE 16TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON E-HEALTH NETWORKING, APPLICATIONS AND SERVICES (HEALTHCOM). **2014 IEEE 16th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom)**. out. 2014. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7001877>. Acesso em: 2 maio. 2025

MISHRA, Prabhaker *et al.* Descriptive statistics and normality tests for statistical data. **Annals of cardiac anaesthesia**, v. 22, n. 1, p. 67-72, 2019.

MOUHA, Radouan Ait Radouan Ait. Internet of Things (IoT). **Journal of Data Analysis and Information Processing**, v. 09, n. 02, p. 77, 21 abr. 2021.

NIU, Ziang *et al.* Deep learning-based ranging error mitigation method for UWB localization system in greenhouse. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 205, p. 107573, 1 fev. 2023.

QORVO. **APH007 Application Note: Antenna Selection / Design Guided for DW1000**. , 2024. Disponível em: <https://www.qorvo.com/products/p/DW1000#documents>. Acesso em: 4 jul. 2025

QORVO. **Getting Back to Basics with Ultra-Wideband**. Disponível em: <https://www.qorvo.com/innovation/ultra-wideband/resources/white-papers>. Acesso em: 11 abr. 2025.

RAZZAQUE, Mohammad Abdur *et al.* Middleware for Internet of Things: A Survey. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 3, n. 1, p. 70-95, fev. 2016.

SAMAMA, Nel. **Indoor Positioning: Technologies and Performance**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2019.

SMIRNOV, Nickolay. Table for estimating the goodness of fit of empirical distributions. **The annals of mathematical statistics**, v. 19, n. 2, p. 279-281, 1948.

TAYLOR, John R. **Introdução à análise de erros: o estudo de incertezas em medições físicas**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2012.

YUSHI, Lan; FEI, Jiang; HUI, Yu. Study on application modes of military Internet of Things (MIOT). *In: 2012 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE AND AUTOMATION ENGINEERING (CSAE)*. **2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE)**. maio 2012. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6273031>. Acesso em: 2 maio. 2025

ZHOU, Wei *et al.* Discovering and understanding the security hazards in the interactions between {IoT} devices, mobile apps, and clouds on smart home platforms. *In: 28TH USENIX SECURITY SYMPOSIUM (USENIX SECURITY 19)*. **Anais...** 2019.