

IPL

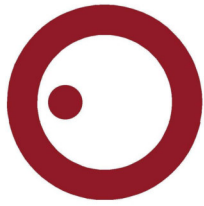
escola superior de tecnologia e gestão
instituto politécnico de leiria

Instituto Politécnico de Leiria
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Eng.^a Eletrotécnica – Eletrónica e Telecomunicações

**SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO EM AMBIENTE
INTERIOR BASEADO EM UWB**

RUI MIGUEL VIEIRA GOMES

Leiria, Março de 2022



IPL

escola superior de tecnologia e gestão
instituto politécnico de leiria

Instituto Politécnico de Leiria
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Eng.^a Eletrotécnica – Eletrónica e Telecomunicações

**SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO EM AMBIENTE
INTERIOR BASEADO EM UWB**

RUI MIGUEL VIEIRA GOMES

Dissertação realizada sob orientação do Professor Luís Manuel Conde Bento (luis.conde@ipleiria.pt)
e Professor Hugo Filipe Costelha De Castro (hugo.costelha@ipleiria.pt)

Leiria, Março de 2022

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus orientadores, Professor Luís Manuel Conde Bento e Professor Hugo Filipe Costelha de Castro, pelo apoio e disponibilidade prestados ao longo deste trabalho.

Quero agradecer também à minha família pelo apoio, pelo carinho e motivação que me prestaram durante toda a minha vida académica e em especial nesta etapa.

A todos os meus amigos e colegas, pela força que prestaram em momentos menos fáceis.

Pretendo ainda agradecer à Carfi - Fábrica de Plásticos e Moldes, SA, ao meu chefe e a todos os colegas do meu departamento, pelas horas de apoio, pela motivação e pela paciência demonstrados ao longo deste percurso. Por isso muito obrigado.

Este trabalho foi parcialmente financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto UIDB/50014/2020.

RESUMO

A localização e monitorização em ambiente interior tem vindo a ficar cada vez mais proeminente em diversos sectores industriais. A possibilidade de acompanhar processos, torná-los autónomos ou até mais seguros continua a proporcionar cada vez mais desafios. O *Ultra-wideband* (UWB) tem sido referenciada como uma possível alternativa dada a precisão (abaixo da dezena de centímetros), que diferentes estudos e fabricantes apresentam. O UWB pode ser utilizado para obter as distâncias através da comunicação por radiofrequência (*Radiofrequency* - RF) entre uma *tag* (dispositivo a ser localizado) e os vários dispositivos de referência (âncoras). Obtendo a medida da distância a cada âncora e sabendo as coordenadas das mesmas, é possível aplicar algoritmos de estimação da posição e obter uma localização aproximada da *tag*. Este estudo analisa e caracteriza esta tecnologia num cenário de localização em ambiente interior com características industriais, analisando a sua capacidade para situações de localização estática, assim como para localização dinâmica. A caracterização envolve analisar o erro das distâncias medidas e depois na estimativa das posições, bem como avaliar o impacto que a instalação das âncoras possuem. Pretende-se também acrescentar conhecimento e novos dados sobre a parametrização das várias configurações desta tecnologia, podendo servir de suporte para estudos e análises em trabalhos futuros.

Palavras-chave: Sistemas de localização em ambiente interior, *ultra-wideband*, localização 3D, diluição de precisão, MDEK1001.

ABSTRACT

Indoor tracking and monitoring has become increasingly prominent in various industrial sectors. The possibility of monitoring processes, making them autonomous or even safer continues to provide more and more challenges. *Ultra-wideband (UWB)* has been referred to as a possible alternative given the precision (below ten centimeters) that different studies and manufacturers present. *UWB* can be used to obtain distances through *Radiofrequency (RF)* communication between a *tag* (device to be located) and the various reference devices (anchors). Obtaining the measurement of the distance to each anchor and knowing their coordinates, it is possible to apply position estimation algorithms and obtain an approximate location of the *tag*. This study analyzes and characterizes this technology in an indoor location scenario with industrial characteristics, analyzing its capacity for static location situations, as well as for dynamic location. The characterization involves analyzing the error of the measured distances and then estimating the positions, as well as evaluating the impact that the installation of anchors has. It is also intended to add knowledge and new data on the parameterization of the various configurations of this technology, which can serve as a support for studies and analyzes in future works.

Keywords: Indoor localization systems, *ultra-wideband*, 3D localization, dilution of precision, MDEK1001.

ÍNDICE

| | |
|--|------|
| Agradecimentos | i |
| Resumo | iii |
| Abstract | v |
| Índice | vii |
| Lista de Figuras | ix |
| Lista de Tabelas | xiii |
| Lista de Abreviaturas | xvii |
| | |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Enquadramento | 1 |
| 1.2 Objetivos e contribuições | 2 |
| 1.3 Estrutura | 2 |
| | |
| 2 TECNOLOGIAS DE SUPORTE E TRABALHO RELACIONADO | 3 |
| 2.1 Tecnologias de Suporte | 3 |
| 2.1.1 Tecnologias de localização para ambiente interior | 3 |
| 2.1.2 Métricas e comparação dos sistemas de localização em ambiente interior | 6 |
| 2.1.3 Técnicas de localização | 8 |
| 2.1.4 Sistemas de localização em ambiente interior baseados em UWB | 15 |
| 2.2 Trabalhos Relacionados | 17 |
| | |
| 3 DESENVOLVIMENTO | 21 |
| 3.1 Caracterização do equipamento e ferramentas | 21 |
| 3.1.1 Decawave MDEK1001 | 21 |
| 3.1.2 Equipamentos de medição | 28 |
| 3.2 Aplicações de <i>software</i> | 30 |
| 3.2.1 <i>Software</i> de suporte | 30 |
| 3.2.2 Protocolo de comunicação UWB | 34 |
| 3.2.3 Sistemas de calibração | 37 |
| 3.3 Sistema de localização em ambiente interior | 40 |
| 3.3.1 Local de implementação e colocação as âncoras | 40 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.3.2 | Cálculo da posição | 47 |
| 4 | TESTES E RESULTADOS | 51 |
| 4.1 | Realização dos testes | 51 |
| 4.2 | Estudo da Diluição de Precisão | 55 |
| 4.3 | Análise das distâncias | 58 |
| 4.4 | Análise aos testes estáticos | 60 |
| 4.4.1 | Teste 1 - Âncoras em <i>LOS</i> | 60 |
| 4.4.2 | Teste 2 - Âncora 5 em <i>NLOS</i> | 64 |
| 4.4.3 | Teste 3 - <i>NLOS</i> | 69 |
| 4.5 | Análise aos testes dinâmicos | 73 |
| 4.5.1 | Teste velocidade 1 | 77 |
| 4.5.2 | Teste velocidade 2 | 80 |
| 5 | CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO | 83 |
| | BIBLIOGRAFIA | 87 |
| | Anexos | |
| A | ANEXO A | 93 |
| A.1 | Repositório | 93 |
| A.2 | <i>Firmware</i> - MDEK1001 Deacawave | 93 |
| A.3 | Ferramentas de análise - <i>Python 3</i> | 95 |
| A.4 | Testes dinâmicos - Instalação <i>encoder</i> - tapete transportador linear | 95 |
| | DECLARAÇÃO | 99 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1 | Representação de técnicas de localização | 8 |
| Figura 2 | Representação do AoA. | 10 |
| Figura 3 | Representação do método ToF [6] | 10 |
| Figura 4 | ToA em 2D, AN representam os pontos de referência conhecidos e TN o dispositivo a ser localizado [12] | 11 |
| Figura 5 | Representação do TDoA [6] | 12 |
| Figura 6 | Exemplo de aplicação do TDoA, onde AN são os pontos de referência conhecidos e TN o dispositivo a ser localizado [12] | 12 |
| Figura 7 | The LOF caption | 13 |
| Figura 8 | Representação de um sinal UWB no recetor [16] | 16 |
| Figura 9 | Dispositivo DWM1001 pertencente ao kit de desenvolvimento MDEK1001 - Decawave | 22 |
| Figura 10 | Representação do <i>Clock-Drift</i> entre dispositivo A e B [7] | 26 |
| Figura 11 | Representação do <i>Antenna Delay</i> [7] | 26 |
| Figura 12 | Representação do <i>Bias Correction</i> [7] | 29 |
| Figura 13 | Teodolito utilizado para as obter as coordenadas (x, y, z) dos pontos de referência em testes. | 29 |
| Figura 14 | Medidor a laser DEXTER30M | 30 |
| Figura 15 | Esquema simplificado do SLI proposto. | 31 |
| Figura 16 | Esquema representativo do <i>firmware</i> desenvolvido para as âncoras e <i>tag</i> | 32 |
| Figura 17 | Exemplo de representação de CIR. | 32 |
| Figura 18 | Exemplo da comunicação UWB utilizado entre a <i>tag</i> e as âncoras. | 33 |
| Figura 19 | Representação do método RTOF [7] | 35 |
| Figura 20 | Representação do método para o reajuste do valor do <i>Antenna Delay</i> | 37 |
| Figura 21 | Histogramas resultantes do reajuste do <i>Antenna Delay</i> | 39 |
| Figura 22 | Laboratório de Robótica Avançada e Fábricas Inteligentes do Politécnico de Leiria-ESTG. Foto panorâmica da sala. | 41 |
| Figura 23 | Exemplo de comunicação LOS(s_1), NLOS(s_3) e de multi-caminho(s_2) possíveis de existir num ambiente interior [26]. | 42 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 24 | Exemplos de impacto de GDOP diferentes [29]. | 44 |
| Figura 25 | Exemplo de fixação da âncora no teto metálico. | 45 |
| Figura 26 | Representação da sala em 2D e disposição das âncoras numeradas e com as respectivas coordenadas. | 46 |
| Figura 27 | Análise da distância reportada pela tag quando sujeita à rotação e com um obstáculo de pvc na linha de vista. | 53 |
| Figura 28 | Testes das distâncias. | 54 |
| Figura 29 | Posição da tag no teste 1 e teste 2. | 55 |
| Figura 30 | Posição da tag no teste 3, existe maior probabilidade de comunicações em NLOS. | 56 |
| Figura 31 | Tapete transportador linear. | 56 |
| Figura 32 | Representação em 2D da sala. | 57 |
| Figura 33 | Representação dos valores de HDOP, o VDOP e PDOP - 1 metro. | 58 |
| Figura 34 | Representação dos valores de HDOP, o VDOP e PDOP - 0.01 metro. | 58 |
| Figura 35 | Representação dos valores de HDOP, o VDOP e PDOP - 2 metros. | 59 |
| Figura 36 | Histogramas de análise ao erro de 2000 medidas de distâncias com as várias rotações da âncora 0 em relação à tag. | 61 |
| Figura 37 | Histograma comparativo do erro entre uma comunicação em LOS e uma comunicação em NLOS. | 62 |
| Figura 38 | Histogramas de análise ao erro das distâncias e da média do erro para as várias âncoras no teste 1 estático. | 64 |
| Figura 39 | Comparação do erro das várias distâncias medidas no teste 1 estático. | 65 |
| Figura 40 | Erro das estimativas de posição efetuadas no teste 1 (LOS) utilizando a todas as âncoras (8). | 66 |
| Figura 41 | Projeção do erro da posição no teste 1 (LOS) pelos vários conjunto de eixos. | 66 |
| Figura 42 | Erro das estimativas de posição no teste 1 (LOS) obtidas retirando as âncoras 0 e 1 para os cálculos. | 67 |
| Figura 43 | Projeção do erro da posição para o teste 1 (LOS) utilizando apenas as âncoras de 2 a 7 nas estimativas. | 67 |
| Figura 44 | Histogramas de análise ao erro das distâncias obtidas às 8 âncoras no teste 2. | 69 |
| Figura 45 | Comparação do erro das várias distâncias medidas para o teste 2 mas com a âncora 5 em NLOS. | 70 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 46 | Erro das estimativas da posição no teste 2 utilizando 8 âncoras para o cálculo e com a âncora 5 em <i>NLOS</i> | 71 |
| Figura 47 | Projeção do erro da posição utilizando apenas as âncoras para o teste 2. | 71 |
| Figura 48 | Erro das estimativas da posição no teste 2 utilizando apenas as âncoras de 2 a 7 para o cálculo. | 72 |
| Figura 49 | Projeção do erro da posição utilizando apenas as âncoras de 2 a 7 para o teste 2. | 72 |
| Figura 50 | Histogramas de análise ao erro das distâncias obtidas às 8 âncoras para o teste 3 estático (situação de <i>NLOS</i>). | 73 |
| Figura 51 | Comparação do erro das várias distâncias medidas para o teste 3. | 74 |
| Figura 52 | Erro das estimativas da posição no teste 3 <i>NLOS</i> utilizando 8 âncoras. | 75 |
| Figura 53 | Projeção do erro da posição nos vários eixos no teste 3 <i>NLOS</i> utilizando 8 âncoras. | 75 |
| Figura 54 | Erro das estimativas da posição no teste 3 utilizando as âncoras [03457]. | 76 |
| Figura 55 | Projeção do erro da posição nos vários eixos no teste 3 utilizando as âncoras [03457]. | 77 |
| Figura 56 | Representação da regressão linear. | 78 |
| Figura 57 | Posição em 3D do movimento real da <i>tag</i> e as estimativas obtidas, utilizando 8 âncoras para o teste de velocidade 1. | 78 |
| Figura 58 | Erro em posição no teste de velocidade 1 obtido com as estimativas das distâncias de 8 âncoras. | 79 |
| Figura 59 | Posição 3D do movimento real da <i>tag</i> e as estimativas obtidas, utilizando 8 âncoras para o teste de velocidade 2. | 80 |
| Figura 60 | Erro obtido com as estimativas das distâncias obtidas com 8 âncoras nos vários eixos para o teste de velocidade 2. | 81 |
| Figura 61 | Estrutura de pastas e ficheiros importantes do repositório criado. | 94 |
| Figura 62 | <i>Encoder</i> utilizado para contar os pulsos do tapete. | 97 |
| Figura 63 | Representação da conexão entre o Arduino e o <i>encoder</i> | 97 |
| Figura 64 | Representação dos testes dinâmicos elaborados. | 98 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----------|---|----|
| Tabela 1 | Comparação das tecnologias mais comuns utilizadas para SLI . Valores de precisão são valores aproximados. | 19 |
| Tabela 2 | Canais disponíveis para o uso em UWB [16]. Nesta tabela f_c representa a frequência central e BW representa a largura de banda. | 25 |
| Tabela 3 | Valores <i>standard</i> para correção de acordo com os valores de RSL fornecida pela documentação da Decawave [7]. | 28 |
| Tabela 4 | Valores estatísticos obtidos durante o reajuste do <i>Antenna Delay</i> | 40 |
| Tabela 5 | Coordenadas das âncoras. | 46 |
| Tabela 6 | Tabela de comparação dos valores de diluição de precisão para diferentes alturas da <i>tag</i> ao longo da sala de teste. Foram determinadas as médias (\bar{x}), desvio padrão (σ), máximos(<i>max</i>) e mínimos(<i>min</i>) dos coeficientes. | 60 |
| Tabela 7 | Tabela de análise aos valores de diluição de precisão para a posição 1 (<i>LOS</i>) e posição 2. | 60 |
| Tabela 8 | Resultados estatísticos do teste de rotação da âncora 0. | 62 |
| Tabela 9 | Resultados do teste de LOS vs NLOS à distância de 9110 mm. | 63 |
| Tabela 10 | Análise às distâncias medidas para o teste 1 (<i>LOS</i>). | 63 |
| Tabela 11 | Resultados estatísticos do teste 1 usando todas as 8 âncoras. | 65 |
| Tabela 12 | Resultados estatísticos do teste 1 usando apenas 6 âncoras. | 68 |
| Tabela 13 | Análise às distâncias medidas no teste 2 com a âncora 5 em NLOS | 68 |
| Tabela 14 | Resultados estatísticos do teste 2 usando 8 âncoras e com a âncora 5 em NLOS | 68 |
| Tabela 15 | Resultados estatísticos do teste 2 usando apenas 6 âncoras. | 70 |
| Tabela 16 | Resultados estatísticos do teste 2 usando apenas 5 âncoras. | 70 |
| Tabela 17 | Análise do erro das distâncias medidas na posição do teste 3. | 74 |
| Tabela 18 | Resultados estatísticos do teste 3 usando 8 âncoras. | 76 |
| Tabela 19 | Resultados estatísticos do teste 3 usando 5 âncoras. | 77 |
| Tabela 20 | Resultados do erro em cada eixo do teste de velocidade 1. | 79 |
| Tabela 21 | Erro em cada eixo obtido no teste de velocidade 2. | 80 |

Tabela 22 Tabela com as descrições dos principais *script's* em linguagem
Python 3, utilizados para tratamento os dados. 96

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|--------|--|
| 2D | duas dimensões. |
| 3D | três dimensões. |
| AoA | <i>Angle of Arrival.</i> |
| AP | <i>Access-Point.</i> |
| API | <i>Application Programming Interface.</i> |
| CIR | <i>Channel Impulse Response.</i> |
| DOP | <i>Dilution of Precision.</i> |
| DS-TWR | <i>Doubled-sided Two-way Ranging.</i> |
| FSL | <i>First-path Signal Level.</i> |
| GDOP | <i>Geometric Dilution of Precision.</i> |
| GNSS | <i>Global Navigation Satellite System.</i> |
| GPS | <i>Global Positioning System.</i> |
| ICP | <i>Iterative Closest Point.</i> |
| IDE | <i>Integrated Development Environment.</i> |
| IMU | <i>Inertial Measurement Unit.</i> |
| IoT | <i>Internet of Things.</i> |
| IR | <i>Impulse Radio.</i> |
| ITLS | <i>Iterative Least Squares.</i> |
| Kbps | Kilobits por segundo. |
| LoRa | <i>Long-Range.</i> |
| LOS | <i>Light-of-Sight.</i> |
| LS | <i>Least Squares.</i> |
| Mbps | Megabits por segundo. |
| NFC | <i>Near Field Communication.</i> |
| NLOS | <i>Non-Light-of-Sight.</i> |
| OTP | <i>One Time Programmable.</i> |

| | |
|---------|---|
| PANS2.0 | <i>Positioning and Networking stack 2.0.</i> |
| PCB | <i>Printed Circuit Board.</i> |
| PDoA | <i>Phase Difference of Arrival.</i> |
| PDP | <i>Power Delay Profile.</i> |
| PoA | <i>Phase of Arrival.</i> |
| PRF | <i>Pulse Repetition Frequency.</i> |
| QR | <i>Quick Response.</i> |
| RF | <i>Radiofrequency.</i> |
| RFID | <i>Radiofrequency Identification.</i> |
| RMSE | <i>Root Mean Squared Error.</i> |
| RSL | <i>Received Signal Level.</i> |
| RSSI | <i>Received Signal Strength Indication.</i> |
| RTLS | <i>Real-Time Localization System.</i> |
| RTOF | <i>Return Time of Flight.</i> |
| RTT | <i>Round Trip Time.</i> |
| SLI | Sistema(s) de Localização (em Ambiente) Interior. |
| SPI | <i>Serial Peripheral Interface.</i> |
| SS-TWR | <i>Single-sided Two-way Ranging.</i> |
| TDoA | <i>Time Difference of Arrival.</i> |
| ToA | <i>Time of Arrival.</i> |
| ToF | <i>Time of Flight.</i> |
| TWR | <i>Two-way-ranging.</i> |
| UART | <i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter.</i> |
| USB | <i>Universal Serial Bus.</i> |
| UWB | <i>Ultra-wideband.</i> |

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

A tecnologia existente/aplicada em ambiente exterior(*outdoor*), como o *Global Positioning System* (GPS), possui uma boa capacidade de localização e são alvo de utilização e melhorias de forma massiva, devido à necessidade de sistemas de localização por várias "indústrias". Os sistemas existentes apresentam erros na gama dos metros fora de edifícios mas, no interior dos edifícios, o GPS, por exemplo, perde capacidade, significando que existem erros significativos na estimativa das posições, o que pode representar uma dificuldade em localizações com necessidade de operar na grandeza dos centímetros.

A localização em ambiente interior possui diferentes dificuldades comparativamente aos sistemas em ambiente exterior. Por exemplo, a existência em proximidade de vários objetos, paredes e até pessoas, proporciona um ambiente sujeito a reflexões, multi-caminho ou até atrasos no sinal de comunicação devido a comunicações sem linha de vista (*Non-Light-of-Sight* - NLOS). Por outro lado, o facto de possuímos uma área definida ou limitada pelo ambiente utilizado (comparativamente às tecnologias para ambiente exterior, são áreas mais pequenas), torna possível obter um maior controlo sobre algumas características do ambiente em causa, como a possibilidade de pré-determinar objetos/obstáculos/limites ou divisões, entre outras. As restantes características destes sistemas estão associadas às tecnologias em que estas funcionam e as técnicas que utilizam para o cálculo de posições, podendo, conforme cada tecnologia, ter um maior impacto no ambiente de instalação. Por fim, existem métricas usadas para descrever ou avaliar um sistema de localização e que, da mesma forma, variam não só por tecnologias e/ou técnicas, mas também pelos requisitos necessários para a sua implementação, nomeadamente precisão, escalabilidade, consumos, entre outros.

Atualmente, existe uma extensa lista de trabalhos elaboradas sobre as várias técnicas Sistema(s) de Localização (em Ambiente) Interior (SLI) existentes, onde são analisados as suas vantagens e desvantagens, bem como as suas potencialidades e aplicações possíveis. Diferentes abordagens ou tecnologias são propostas, usando

desde infravermelhos, ultrassons, campos magnéticos, métodos óticos, radiofrequência e visão, entre outros. Quanto aos algoritmos usados para localização, estes dependem das tecnologias utilizadas. A avaliação e caracterização dos sistemas e respectivas técnicas de cálculo de posição são importantes, por forma a compreender as suas possibilidades de utilização e se cumprem com as necessidades e requisitos do ambiente de aplicação ou de estudo.

A tecnologia *Ultra-wideband* (UWB) tem ganho relevância como uma possível solução para o SLI. Existe uma necessidade de se determinar e caracterizar as capacidades desta tecnologia tanto na precisão como na capacidade de operar em diversos locais. A possibilidade de se conseguir uma implementação que consegue operar mesmo em alguns ambientes onde a linha de vista se encontra afetada, sem necessidade de alteração da infraestrutura (tecnologia sem fios) e com erros na gama dos centímetros, torna esta tecnologia uma boa alternativa a ser explorada.

1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

O objetivo deste trabalho é o estudo e caracterização da tecnologia UWB para ser utilizada em SLI, perceber a importância da colocação das âncoras, bem como analisar o erro das distâncias medidas. A capacidade de vários algoritmos em estimar a posição em três dimensões (3D) em modo estático e dinâmico é, também, um dos objetivos deste trabalho.

1.3 ESTRUTURA

A estrutura do documento está organizado em 5 capítulos. No Capítulo 1 é abordado o tema de localização para ambiente interior e a motivação deste trabalho. No Capítulo 2 são abordadas as tecnologias de suporte relevantes para este trabalho, assim como os trabalhos relacionados que representam o estado da arte. No Capítulo 3 é apresentado o desenvolvimento e implementação realizados. No Capítulo 4 descrevem-se os testes que foram elaborados e analisam-se os resultados. No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões sobre o trabalho desenvolvido e apresentam-se propostas de trabalho futuro.

TECNOLOGIAS DE SUPORTE E TRABALHO RELACIONADO

Neste capítulo é abordado o tema da localização em ambiente interior, algumas das tecnologias e técnicas mais utilizadas, as métricas típicas de avaliação e comparação dos SLI. Finalmente apresenta-se como a tecnologia UWB pode ser utilizada para a localização assim como alguns estudos realizados utilizando esta tecnologia.

2.1 TECNOLOGIAS DE SUPORTE

Nesta secção, são abordadas as tecnologias mais utilizadas para localização em ambiente interior. São descritas comparações e formas possíveis de utilização das tecnologias para localização. Finalmente, é abordada a tecnologia UWB, descrevendo as suas características e possível aplicação.

2.1.1 *Tecnologias de localização para ambiente interior*

Existem inúmeras tecnologias utilizadas para localização em ambiente interior, sendo apenas abordadas as consideradas mais relevantes no âmbito deste trabalho. Analisando as vantagens, desvantagens e modo de funcionamento destas tecnologias, é possível determinar quais as que melhor cumprem ou se adaptam aos requisitos necessários, tendo em conta o ambiente de implementação. Existem diferentes formas de as categorizar, seja pelo tipo de sinal ou pelas técnicas de localização que utilizam. Abordam-se aqui as tecnologias existentes mais comuns e, para mais fácil descrição, estas são categorizadas consoante o tipo de sinal.

Os sistemas baseados em visão computacional, utilizam a análise de imagens ou identificação de pontos de referência para poder estimar a localização de objetos ou pessoas. Para tal, são utilizadas câmaras de forma a obter imagens, sendo estas analisadas para extrair a informação pretendida. Analisando uma sequência de imagens com uma câmara fixa é possível determinar posições em duas dimensões (2D). Para aplicações 3D, poderá ser necessário a instalação de duas ou mais

câmaras numa divisão ou local amplo com LOS, onde a câmara tenha capacidade de capturar imagens com sobreposição de zonas de cobertura. Outra abordagem utiliza objetos conhecidos, como códigos *Quick Response* (QR), ao redor de um local de implementação e, a câmara ao movimentar-se, detecta os pontos de referência (dos códigos QR) e determina a sua localização, com base nos pontos de referência previamente conhecidos relativamente ao código QR. Conforme a qualidade do equipamento utilizado (características da câmara), das “variáveis” inerentes ao ambiente de implementação (brilho, reflexões, etc.) e da distância aos pontos de referência, é possível obter resultados na ordem dos milímetros [1]. Contudo, existe a necessidade de utilizar algoritmos computacionalmente complexos para efetuar a deteção das características relevantes do ambiente, aumentando também a complexidade e custo do sistema. Este tipo de tecnologias podem representar um custo elevado associado ao equipamento, dependendo da qualidade do equipamento e da sua capacidade, ou pode implicar a necessidade de instalação de várias câmaras para aumentar a capacidade do sistema (cobertura e/ou precisão). Desta forma, a complexidade do sistema poderá aumentar em termos de computação e análise de imagens. Ângulos mortos ou objetos que se encontrem no campo de visão da câmara podem também representar um problema para a estimativa da localização [2][3].

As tecnologias de **infravermelho** usam sinais de luz invisível do espectro de luz e eram muito utilizadas, por exemplo, para comunicações entre dispositivos eletrónicos. Estes podem ser usadas de duas formas diferentes para a localização: através de radiação direta, onde a comunicação é efetuada ponto-a-ponto; ou através do modo de difusão, em que não é necessário que ambos os dispositivos estejam em linha de vista LOS [4]. Esta tecnologia poderá ter um custo baixo, quando usada para pequenas dimensões, mas a cobertura e a precisão poderá ser limitada. Caso seja necessário aumentar a cobertura e melhorar a precisão, poderão ser necessárias várias alterações na infraestrutura. Poderão existir interferências nas comunicações através de luz fluorescente, ou até a luz solar [2].

As tecnologias de **ultrassons** utilizam o som numa frequência não audível pelo ser humano para a sua implementação em sistemas de localização. O processo é algo semelhante à tecnologia anterior, mudando apenas o meio, *i.e.*, utiliza-se uma onda mecânica para o mesmo efeito. Alguns estudos demonstraram que possui boa precisão, a nível dos centímetros, mas em relação à cobertura poderá não ser mais que alguns metros de distância [5].

Radiofrequency Identification (RFID) é um método de identificação que funciona usando sinais rádio entre leitores e etiquetas (*tags*) RFID. Os leitores

emitem o sinal e as etiquetas reagem com o seu identificador único ou informação guardada. Existem *tags* passivas e ativas, sendo que estas últimas possuem a sua própria alimentação, o que pode aumentar a capacidade de comunicar a maiores distâncias. Um exemplo de um sistema de localização, utilizando o princípio desta tecnologia, seria distribuir diversos leitores ou *tags* pela infraestrutura com posições/locais previamente conhecidos e, quando alguma leitura fosse detetada, seria estimada a localização [5].

A tecnologia **Near Field Communication (NFC)** funciona de forma similar à tecnologia RFID, em que, neste caso, esta está presente em alguns dispositivos utilizados no dia a dia, como o telemóvel. Um exemplo de aplicação desta tecnologia é os pagamentos por aproximação (*Contactless*). As comunicações são efetuadas a distâncias inferiores que a tecnologia anterior apresentada, e a sua utilização, para localização, passa por utilizar o mesmo conceito do RFID anteriormente referenciado[4].

A tecnologia **Wi-Fi**, comparativamente com as restantes, é a tecnologia mais abundante nos ambientes interiores, permitindo conectividade entre dispositivos e acesso à Internet. A maioria dos dispositivos, como telemóveis e computadores, possuem conectividade *Wi-Fi*, tornando uma tecnologia ideal para novos desenvolvimentos e novas implementações. A existência de pontos de acesso (*Access-Point - AP*) espalhados pelos edifícios, de modo a dar cobertura de sinal *Wi-Fi*, poderão ser usados como pontos de referência para a localização. Em termos de cobertura, o sinal *Wi-Fi* funciona ao redor da capacidade dos AP, podendo cobrir áreas de dezenas de metros ou, em alguns casos, até centenas de metros. Os equipamentos para esta tecnologia estão adaptados para possibilitar comunicações e não ajustada para propósitos de localização, representando um desafio em termos de disponibilidade de sinal para localização [3].

A tecnologia **Bluetooth** existe em bastantes dispositivos utilizados em ambiente interior e, tal como o *Wi-Fi*, serve o propósito de permitir a comunicação entre dispositivos. Este foi desenvolvido para comunicações ponto-a-ponto, não tendo a capacidade idêntica à do *Wi-Fi*. Esta tecnologia é utilizada por diversas empresas de desenvolvimento como, por exemplo, a Apple (iBeacon). Esta utiliza dispositivos de referência (*beacons*) para detetar proximidade que podem ser espalhados pelo local de implementação [6][5].

A tecnologia **Zigbee** foi desenvolvida para comunicações entre dispositivos com ênfase no baixo consumo comunicações com poucos dados e de baixo consumo.

Adaptado para rede de sensores. Em termo de localização, não possuem grande precisão e não existe em abundância nos dispositivos[5].

A tecnologia **UWB** foi desenvolvida principalmente para comunicações e para permitir criar sistemas de localização [5] de baixo consumo. O facto de utilizar frequências fora do espectro onde outras tecnologias operam, torna esta tecnologia imune a essas interferências. As suas propriedades tornam esta tecnologia capaz de superar desafios nos ambientes interiores, *e.g.* tem capacidade de penetração em diversos materiais. Um exemplo de aplicação consiste na utilização de âncoras, como pontos de referência conhecidos e fixos, e um dispositivo *tag*, o qual comunica com as âncoras para determinar as distâncias até às mesmas. Utilizando um conjunto de medidas é possível determinar a localização. Adicionalmente, a possibilidade de obter localização com um erro nas grandezas dos centímetros, torna desta tecnologia uma opção viável quando comparada com as demais[5][3][7].

Foram referenciadas as tecnologias mais comuns para utilização em SLI. Outras possíveis tecnologias podem ser usadas para SLI, tais como LoRa, *SigFox*, Luz visível, sinais com base na rede móvel celular. Existe ainda a possibilidade de se integrar duas ou mais tecnologias (sistemas híbridos), podendo combinar vantagens e/ou colmatar algumas das desvantagens das tecnologias quando usadas individualmente [4].

Nazir, Arshad, Shahid et al. ([8]), apresentam com bastante profundidade os modos de operação possíveis de se implementar sistemas (SLI). Nesse trabalho, as tecnologias foram classificados em diferentes modos de operação, dependendo da forma como funcionam, ou como e onde são efetuadas as estimativas das posições. Adicionalmente, são referidas algumas métricas utilizadas pelos autores para caracterizar os vários SLI, que da mesma forma serão enunciadas de seguida.

2.1.2 Métricas e comparação dos sistemas de localização em ambiente interior

Nesta secção são apresentadas algumas das principais métricas de avaliação dos sistemas tipicamente utilizadas para avaliar a performance dos mesmos:

- **Precisão/erro:** métrica importante de avaliação dos sistemas, que se pode definir como a proximidade entre os valores medidos e os valores reais [2], ou a diferença, no caso do erro. Esta métrica tem elevada importância quando se avalia um sistema e varia conforme as tecnologias, técnicas e o modo de implementação das mesmas.

- **Custo:** métrica que pode ser avaliada por diversos fatores. Nestes podem estar incluídos os custos de instalação ou alterações de infraestruturas, manutenção, consumo de energia, entre outros. Conforme os requisitos para a implementação e, possivelmente o nível de precisão, os custos podem variar.
- **Cobertura/distância:** distância ou área que o sistema permite utilizar no seu funcionamento e que depende da tecnologia a utilizar. Dependendo dos requisitos necessários de implementação, esta métrica ajuda a avaliar viabilidade das tecnologias, tendo em conta o local/área de instalação do sistema de localização.
- **Escalabilidade e complexidade:** no caso da escalabilidade, a possibilidade de o sistema se adaptar a, por exemplo, um aumento de utilizadores, sem que este perca o seu normal funcionamento, ou se existe um limite que impeça o seu normal funcionamento. Em relação à complexidade, esta poderá depender do modo como os sistemas funcionam, hardware que utilizam, ou até na instalação do mesmo. Desta forma a complexidade poderá rever-se nos custos.

Existem ainda outras métricas para análise dos sistemas que se podem ter em conta como, por exemplo, latência nas comunicações, segurança/privacidade nos dados, facilidade de utilização ou modo de aplicação, disponibilidade do sistema em conseguir obter uma posição e consumos. Com estas métricas é possível gerar conclusões, avaliar as várias tecnologias existentes e definir, consoante os requisitos, quais a que poderão ser selecionadas. Por exemplo, alguns sistemas poderão apresentar menor custo na sua implementação mas, em contrapartida, poderão não oferecer uma maior precisão. Percebendo as necessidades ou requisitos da aplicação, seleciona-se quais os melhores sistemas/tecnologias que conseguem cumprir com os requisitos definidos. Consultando os estudos elaborados pelos autores [2], [4], [5], [9], [10], [3] e [6], foi elaborada a Tabela 1, a qual resume algumas das características mais relevantes acerca das várias tecnologias propostas para SLI.

Tendo em conta a informação disponibilizadas na Tabela 1, é notório que, em termos de utilização para SLI, tanto o GPS como a tecnologia baseada em Redes Móveis poderão não ser uma boa opção, devido ao erro na estimativa da posição baseada nestas tecnologias. Tanto a tecnologia *WiFi* como a tecnologia *Bluetooth* possuem uma maior facilidade de implementação, pois a probabilidade da existência destas tecnologias no interior de edifícios/dispositivos é maior. Diversos AP, *smartphones* e outros dispositivos com estas tecnologias espalhados pelos edifícios, contribuem para a facilidade de implementar sistemas de localização. A precisão destas duas tecnologias para a localização dependem da força de sinal, o que em poderá resultar

em variações dos valores estimados para as distâncias. A localização resultante poderá possuir um erro que varie na gama dos metros. Em relação à precisão, ambos os sistemas baseados em visão e UWB possuem erro menor comparativamente com as restantes apresentadas. Ainda a acrescentar, que estas duas últimas tecnologias podem funcionar dedicadas apenas à tarefa de localização. Adicionalmente, trabalhos de instalação e calibração são necessários de se efetuarem. Abordadas as diferentes tecnologias existentes e as suas características, são apresentadas de seguidas as técnicas utilizadas para a localização.

2.1.3 Técnicas de localização

É possível utilizar diferentes técnicas para obter a localização, *i.e.* dependendo do princípio de funcionamento, diferentes algoritmos e propriedades dos sinais podem ser utilizados para determinar as posições. Para o nosso estudo, será dada maior importância às técnicas que utilizam sinais de radiofrequência.

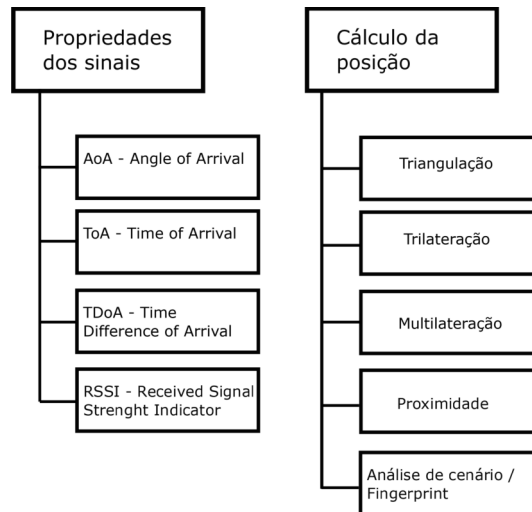


Figura 1: Representação das diferentes formas de efetuar o cálculo da posição e também obter as distâncias/ângulos, através das propriedades dos sinais.

Tendo em conta a Figura 1, podemos observar as diferentes formas de utilizar as propriedades dos sinais e a forma de calcular a posição. Utilizam-se as propriedades dos sinais principalmente para obter o *Received Signal Strength Indication* (RSSI), *Time of Arrival* (ToA), *Time Difference of Arrival* (TDoA) e *Angle of Arrival* (AoA). É possível determinar distâncias e/ou ângulos formados, potência do sinal e, utilizando pontos de referência, aplicar algoritmos para estimar posições.

Descrevemos agora algumas formas de obter dados com as propriedades dos sinais. Nota ao leitor que não abordamos os erros que possam existir em cada um dos seguintes métodos tendo em conta as tecnologias que os podem usar.

- RSSI - quando um sinal se propaga entre um emissor e um recetor, este é alvo de uma atenuação relacionada com o aumento da distância entre os dispositivos. A energia do sinal é afetada pelo fator *Free Space Path Loss*, que relaciona a distância com a força do sinal, tendo em conta as potências de emissor e recetor e ganhos de ambos. Este deriva da fórmula de *Friis 1*:

$$P_r = P_t + G_t + G_r + 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) [dBW] \quad (1)$$

onde P_r corresponde à potência recebida, P_t refere-se à potência de transmissão, λ é referente ao comprimento de onda e G_t e G_r representam o ganho de transmissão e de receção correspondente. Resolvendo a formula 1 em função da distância (d) é possível determinar a distância [11].

Contudo, é importante entender que a força de sinal no recetor poderá ser uma soma não só do sinal incidente, mas também de reflexões existentes. A mobilidade do dispositivo recetor, as interferências, a variação do canal de comunicação e o ruído podem originar variações no valor do RSSI, causando impacto ao determinar as distâncias, adicionando erro à distância real e consequentemente no cálculo da posição.

- AoA - é a técnica que utiliza as diferenças angulares formadas entre os vários sinais recebidos. A grandeza AoA é determinada pelo o ângulo formado entre a direção de propagação da onda incidente no recetor e uma direção de referência conhecida. Um exemplo possível de efetuar o AoA seria utilizando um *array* de antenas em cada recetor de referência em vez de apenas uma antena. Para determinar o ângulo, a diferença de chegada das ondas incidentes no *array* de antenas, determinam a orientação do sinal, podendo desta forma determinar o ângulo formado em relação à orientação de referência.
- ToA - também referenciado por *Time of Flight* (ToF), é utilizado para determinar a distância entre um emissor e um recetor através do tempo de propagação do sinal e do valor de velocidade da propagação da luz(c).

$$Distance = c \times ToF \quad (2)$$

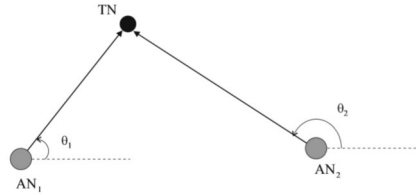


Figura 2: Representação do AoA [12]. Utilizando dois pontos de referência AN_1, AN_2 , é possível determinar os ângulos formados na chegada do sinal (θ_1, θ_2) proveniente do sinal de TN , em relação a uma orientação conhecida.

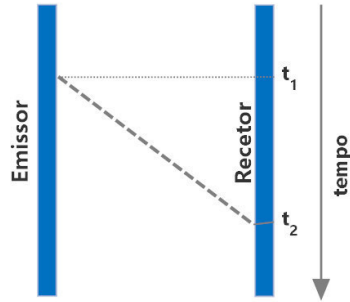


Figura 3: Representação do método ToF [6]

Existem diferentes formas de determinar o tempo de voo das comunicações. Dependendo da técnica que for usada, poderá ser necessário sincronizar todos os dispositivos, implicando um custo maior em *hardware* para garantir o sincronismo.

Um possível método passa pelo transmissor enviar uma mensagem com a referência temporal do tempo de envio (t_1) do sinal. O receptor, ao receber esta comunicação, calcula a distância usando o tempo de aquisição da comunicação (t_2), como apresentado na equação 2 (*vide* Figura 3):

$$Distance = c(t_2 - t_1) \quad (3)$$

Este método requer que todos os dispositivos estejam sincronizados para se obter uma boa precisão.

Outra forma de usar o ToF, é usando um *clock* absoluto no dispositivo a localizar e este contabiliza o tempo de que demora ao comunicar com outro dispositivo e receber a sua resposta. Este método denomina-se de *Return Time of Flight* (RTOF) ou *Round Trip Time* (RTT). Desta forma, o emissor que inicia a contabilização (t_1) fica à espera da resposta imediata para contabilizar

o tempo total de comunicação (t_2) e por fim obter a distância física [6]. É necessário ter em conta o valor do tempo de resposta t_{reply} e também que esta comunicação se efetua nos dois sentidos, portanto sendo necessário dividir por 2, como se pode observar pela equação para o cálculo do RTOF:

$$RTOF = \frac{t_2 - t_1}{2} - t_{reply} \quad (4)$$

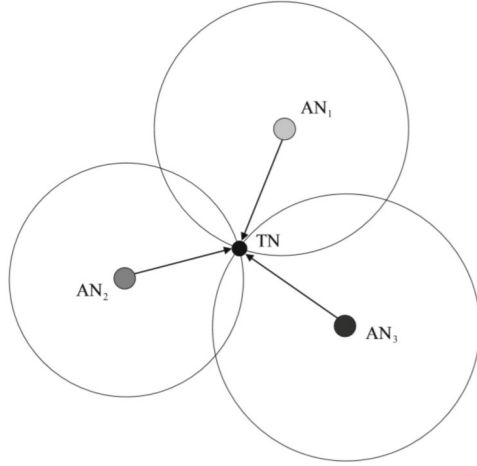


Figura 4: ToA em 2D, AN representam os pontos de referência conhecidos e TN o dispositivo a ser localizado [12]

Determinando o ToF, apenas é necessário substituir na equação 2 para obter a distância. No caso de se utilizar o RTOF, este não requer sincronismo dos dispositivos e a contabilização do tempo absoluto é efetuada apenas no dispositivo que recolhe todas as mensagens. Para tal é importante que o *clock* do dispositivos não sofra desvios ao longo do tempo ou que tenha de se efetuar um ajustes. A Figura 4 representa um exemplo 2D utilizando 3 pontos de referência conhecidos AN_1, AN_2, AN_3 , em que as distâncias se encontram representadas pelas circunferências com centro nos mesmos. Para uma localização 3D, a representação das distâncias será através de uma esfera.

- TDoA - esta técnica, ao contrário do ToA, que usa os tempos absolutos, utiliza a diferença dos tempos de chegada nos dispositivos de referência conhecidos, proveniente de um emissor (dispositivo a ser localizado).

Neste caso apenas os pontos de referência (âncoras) conhecidos necessitam de estar sincronizados. Através da equação 5, é então possível obter as distâncias de cada comunicação.

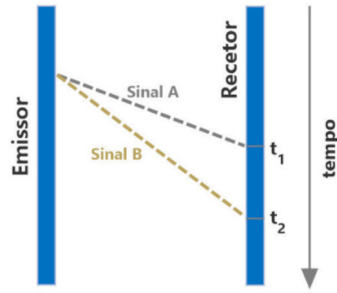


Figura 5: Representação do TDoA [6]

Exemplificando através da Figura 6, em que as âncora (AN1, AN2) recebem uma comunicação da $tag(TN)$, sendo os tempos de recepção t_1 e t_2 respectivamente, então:

$$c(t_2 - t_1) = \sqrt{(x_2 - x)^2 - (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 - (y_1 - y)^2} \quad (5)$$

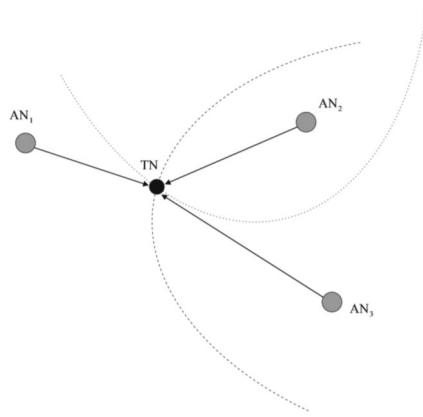


Figura 6: Exemplo de aplicação do TDoA, onde AN são os pontos de referência conhecidos e TN o dispositivo a ser localizado [12]

Comparativamente com o método anterior, para o TDoA, as distâncias são representadas através de hipérbolas (2D), onde a localização do dispositivo pretendido se encontra na interseção destas, como apresentado na Figura 6.

Existem ainda outras propriedades dos sinais possíveis de se utilizar, dependendo das tecnologias utilizadas [2], [4], [5], [9] e [13], nomeadamente *Phase of Arrival* (PoA), *Phase Difference of Arrival* (PDoA), *Power Delay Profile* (PDP), *Channel Impulse Response* (CIR) são outras possibilidades de utilizar as propriedades dos sinais, mais propriamente sinais de radiofrequência.

Os algoritmos de localização ou a forma de calcular a posição usando os sinais obtidos, especificam a forma de como a posição é obtida. Neste caso são abordadas as forma mais comuns de cálculo de posição como a triangulação, a trilateração, a detecção por proximidade e a análise de cenário ou *fingerprinting*. A trilateração e a triangulação são métodos considerados geométricos, pois utilizam geometria básica para determinar a relações entre 2 ou mais pontos de referência. Alguns exemplos da sua utilização para SLI serão dados para uma melhor compreensão.

Os métodos de *fingerprinting* / **análise de cenário**, passam por analisar as características dos sinais obtidos ou informações obtidas e guardar as mesmas. Tipicamente é efetuada uma recolha de dados no local de instalação, obtendo os dados de sinal característico por área geográfica (modo *offline*) para posterior uso na localização (modo *online*), *i.e.* comparados com os sinais obtidos em tempo real. Um exemplo de implementação é a utilização da força de sinal (RSSI) para recolher os dados e mapear os mesmos. Recolhendo um mapa de como varia o RSSI numa divisão ou edifício, é possível comparar em tempo real qual a localização provável do dispositivo - Figura 7. A precisão está dependente da forma como são registadas as características geográficas do sinal. A sua implementação requer algum tempo para o registo em modo *offline* mas depois a sua utilização em modo *online* é bastante simples [13].

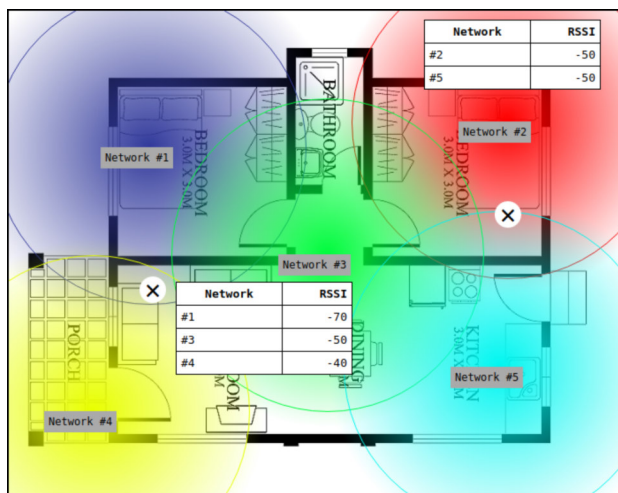


Figura 7: Mapeamento das várias redes *wi-fi* de um edifício e as respetivas forças de sinal dependendo da localização. ¹

Para o método de detecção de **proximidade**, como o nome indica, apenas deteta a proximidade de uma posição de objeto ou área conhecida. A forma de detecção

¹ Retirada de <https://eloquentarduino.github.io/2019/12/wifi-indoor-positioning-on-arduino>

baseia-se na determinação da distância aos pontos de referência e na forma de como se procede à decisão da sua localização. Um exemplo simples seria a utilização de cartões RFID para abertura de portas num interior de edifício. Os dispositivos comunicavam para uma base de dados não só qual a porta utilizada, mas quem teria aberto a mesma. Esta forma de localizar não oferece uma grande capacidade de deteção em termos de tempo de real, pois depende da ação de proximidade efetuada pelo utilizador e também apenas é conhecida uma posição relativa a uma área, neste caso.

As técnicas de localização geométricas (**triangulação/trilateração**) utilizam as distâncias ou ângulos formados entre os pontos de referência conhecidos e o objeto a localizar. Portanto para determinar a posição, apenas é necessário utilizar geometria básica. No caso da triangulação, é necessário obter as relações dos ângulos formados entres os pontos de referência e o objeto a localizar. Para a trilateração, são utilizadas as distâncias entre o dispositivo a localizar e os pontos de referência conhecidos. Para estimar a posição de um objeto é necessário utilizar 2 ou 3 pontos de referência no mínimo, conforme a tipologia, para 2D e três ou mais para estimar posições em 3D.

Para o caso da triangulação e em 2D, tendo como referência a Figura 2, é possível determinar a posição utilizando e equação 6. Sendo as coordenadas (x_1, y_1) e (x_2, y_2) para cada recetor, é possível determinar a posição TN.

$$(x, y) = \left(\frac{y_1 - y_2 + x_2 \tan \theta_2 + x_1 \tan \theta_1}{\tan \theta_2 + \tan \theta_1}, \frac{x_1 - x_2 + y_2 \cot \theta_2 + y_1 \cot \theta_1}{\cot \theta_2 + \cot \theta_1} \right) \quad (6)$$

Com a utilização desta equação 6, o resultado são duas possíveis soluções, sendo necessário efetuar uma decisão para qual a correta.

Exemplificando a trilateração com as Figura 4 e Figura 6, onde são obtidas as distâncias por dois métodos diferentes (ToA e TDoA), utilizando as Equações 3 e 5 respetivamente. Para o caso de duas dimensões (2D) são necessários pelos menos 3 medições de distâncias e para o caso de três dimensões (3D) pelo menos quatro medições.

Abordou-se de uma forma geral as técnicas de localização mais comuns, e para este caso, mais aplicadas para tecnologias que utilizam sinais RF. Existem mais técnicas possíveis de se implementarem, em [5] e [2] os autores descrevem as diferentes técnicas, elaboram comparações e apresentam vantagens e desvantagens. É importante referir também que estas técnicas podem ser implementadas em

diferentes tecnologias. A forma como se determina a posição, varia desta forma, conforme o algoritmo aplicado. Ainda é possível combinar entre várias por forma a melhorar a capacidade do sistema em determinar a posição ou até usar como fator eliminatório em caso de necessidade de escolha/seleção dos dados.

2.1.4 *Sistemas de localização em ambiente interior baseados em UWB*

Com a indústria IoT, houve um impulsionamento no aparecimento de novas implementações de tecnologias de SLI. Uma das tecnologias que tem vindo a ser testada é a *Ultra-wideband* (UWB). A tecnologia UWB foi inicialmente aplicada nos finais dos anos de 1980 em sistemas de comunicação, radar e de localização [14]. É uma tecnologia de comunicações por radiofrequência que opera entre os 3.1GHz até aos 10.6GHz, usando uma largura de banda tipicamente de 500MHz nos vários canais. O principal modo de operação desta tecnologia para a localização consiste em determinar o tempo de voo (ToF) através das comunicações e conseqüentemente obter a distância, considerando que ondas electromagnéticas se deslocam à velocidade da luz. Sendo assim, a obtenção dos tempos necessita de ser precisa a fim de evitar erros nas medições. Para obter estes tempos de forma precisa são necessários envios de pulsos curtos (pequena duração) o que implica possuir uma grande largura de banda. Nos sistemas UWB a potência de transmissão possui restrições o que leva a possuir pulsos fracos, podendo fazer com que estes estejam quase abaixo do valor de ruído no recetor. Para evitar este cenário, os sistemas UWB enviam uma sucessão de pulsos para que no acumulador do recetor resulte num pulso com energia suficiente para ser mais elevado que o ruído e desta forma detetar quando o sinal chegou ao recetor com precisão [15]. Este fator demonstra a possibilidade de distinguir o sinal das reflexões, como representa a Figura 8 onde o pulso maior representa o sinal recebido por LOS e os restantes por reflexões, nos ambientes interiores os dispositivos estão bastante sujeitos a este tipo de efeito. Esta característica é umas das principais vantagens, pois desta forma consegue lidar com o multi-caminho e interferências nos sinais, evitando a degradação do sinal durante a operação dos dispositivos (comunicações). Em caso de uma comunicação se dar em NLOS, e visto que esta tecnologia precisa de detetar os sinais de uma forma precisa, um atraso no tempo de receção do sinal irá existir dando ao resultado da distância obtida um *offset* adicional. A vasta gama de canais que possui para comunicar (diferentes gamas de frequências), proporciona diferentes possibilidades de adaptar a frequência de operação (canal), em conformidade com o país de utilização ou até tendo em conta outras tecnologias/sistemas coexistentes. A capacidade de atravessamento dos

materiais por parte desta tecnologia, leva a que possua melhores resultados que as demais. Em termos de consumo energético, como apenas utilizam pulsos de curta duração não possui consumos elevados no seu funcionamento. Importa referir ainda que esta tecnologia tem como base o padrão IEEE 802.15.4-2011.

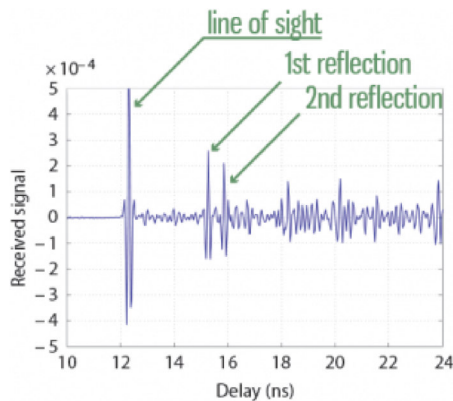


Figura 8: Representação de um sinal UWB no recetor [16]

Existem já algumas empresas, *Nanotron*, *Zebra*, *Time Domain*, *Ubisense*, que possuem sistemas desenvolvidos em tecnologia UWB para utilização em SLI, salientando a *Sewio*, *POZYX* e a *Decawave*. No caso da *Sewio*, trata-se de um sistema "chave-na-mão", estando esta empresa apenas dedicada a comercialização dos seus produtos, mais propriamente os dispositivos de instalação e a plataforma ou *software*. A *POZYX* além da solução comercial, oferece também a possibilidade do cliente desenvolver o seu próprio SLI, adquirindo equipamento que pode integrar com *Arduino* recorrendo a uma biblioteca específica e/ou ao uso de bibliotecas em *Python*, caso se pretenda usar diretamente através da porta *série*. Finalmente a *Decawave* [7], empresa que desenvolve soluções de semicondutores para micro-localização, sediada na Irlanda, mas presente no mercado mundial e que ao mesmo tempo está presente nas tecnologias dos sistemas das marcas/empresas anteriormente apresentadas, mais propriamente o módulo de comunicação UWB. As diferenças entre as várias soluções estão não só nos respetivos dispositivos mas também no conjunto de *software* adicional e os guias de utilização ou de desenvolvimento. Tipicamente os sistemas baseados nesta tecnologia utilizam dispositivos a funcionar como "âncoras", sendo estes os pontos de referência conhecidos, e os dispositivos a serem localizados denominados de "tag". Esta nomenclatura é quase sempre identificada em sistemas baseados nesta tecnologia, a qual também iremos adotar. Dependendo das marcas/empresas, a forma de como funcionam os sistemas, variam consoante a forma como utilizam as propriedades dos sinais e algoritmos para determinar as posições. Alguns possuem

já integrados processos de filtragem de sinais e fusão com outros tipos de sensores a fim de melhorar as estimativas das posições. Analisando o que o fabricante Decawave descreve sobre a sua tecnologia desenvolvida, estes indicam que o uwb é uma tecnologia onde as propriedades físicas dos sinais que utilizam são ideias para a sua utilização em sistemas de localização, comparativamente com as tecnologias Bluetooth e/ou WiFi. Adicionalmente a possibilidade de possuir um baixo consumo. Refere ainda as possíveis aplicações desta tecnologia em áreas como a indústria, desporto, *drones*, ou até no ramo automóvel, em processos de medição de distâncias, de localização e/ou rastreamento em tempo real. Em termos de aplicação do UWB, o fabricante refere as técnicas de estimação de distâncias usando o tempo de voo dos sinais (TDoA e TWR) e/ou a fase da onda transmitida (PDoA) [7].

2.2 TRABALHOS RELACIONADOS

Dos estudos efetuados por vários autores sobre as tecnologias aplicadas à localização em ambientes interiores, a tecnologia UWB sido muito referenciada como uma solução viável. Possui características que a torna uma opção viável para SLI e que a coloca em vantagem comparativamente com as demais [2]. Ao mesmo tempo, a capacidade de coexistir com outras tecnologias existentes no interior de edifícios como o *Wi-Fi*, oferece a possibilidade de integrar os mais variados serviços.

Zwirello, Schipper, Harter et al. estudaram a tecnologia UWB analisando diferentes algoritmos de estimação de posição para TDoA e também abordaram a colocação/distribuição das âncoras no local de testes [17]. Concluíram ser possível obter resultados de erro em 3D dentro da gama dos 10 centímetros aplicando os diferentes métodos que o autor referencia. Adicionalmente, o autor realçou que a localização da *tag* deverá ser efetuada dentro da área delimitada pelas âncoras e que a instalação das mesmas deverá ser realizada por forma a que as âncoras possuam uma maior visibilidade em relação ao dispositivo a localizar.

Utilizando tecnologia da *Decawave*, Jiménez e Seco apresenta resultados de experiências realizadas em dois cenários distintos, primeiro num laboratório/escritório e segundo num apartamento. Situações de obstáculos e NLOS são testados no apartamento e no caso do laboratório apenas se testaram situações LOS. Utilizou-se um total de 8 âncoras, para avaliar o impacto da utilização de um número maior de medições de distâncias do que as necessárias para estimar a posição em 3D juntamente com *firmware* disponibilizado pelo fabricante dos dispositivos utilizados. Adicionalmente, utilizou um filtro de Kalman Extendido. Concluiu que de

facto a utilização de mais âncoras para estimar posições resultava num erro menor comparativamente às estimativas com apenas 4 âncoras em ambos os cenários de testes [18]. O autor refere que os valores de erro obtidos rondavam entre 0.5 metros quando utilizado algum processo de filtragem. Da mesma forma os valores *outliers* originavam elevados erros na estimativa da posição.

Cotera, Velazquez, Cruz et al. implementaram uma solução de localização UWB baseada na *Decawave* num pavilhão desportivo. A abordagem seguida para estimar a localização foi baseada no método *Fang*[20]. Este método determina posição através de apenas um conjunto de 3 distâncias (3 âncoras) sendo adequado para sistemas de baixa capacidade de processamento pois não requer grande capacidade de computacional. Para tal foram distribuídas pelo o pavilhão as várias âncoras e implementado um processo de seleção por zonas para auxílio na seleção das 3 âncoras usadas no cálculo da posição. Este algoritmo exige um processo de "escolha" de quais as âncoras a seleccionar para determinar a estimativa da posição. O autor referiu que com o edifício totalmente vazio obteve valores de erro dentro da gama dos 4 aos 10 centímetros em média em posição 2D [19].

Bonnin-Pascual e Ortiz [21] apresentam trabalhos baseados na tecnologia UWB da *POZYX* mais orientados para a localização em ambiente industrial. Neste trabalho a localização dá suporte a um robô de inspeção de navios de transporte de mercadorias com grandes dimensões, utilizando um método baseado em *Iterative Closest Point* (ICP) para determinar a posição/coordenadas 3D dos locais do navio com defeito. Tanto nos navios como no local de inspeção, existe com abundância elementos metálicos algo que o autor refere ter imenso impacto nos resultados. O autor refere também que os melhores resultados foram obtidos quando introduziu processos de filtragem na obtenção das distâncias e utilizou o método proposto pelo próprio.

A implementação de tecnologia UWB juntamente com sensor de inércia (*Inertial Measurement Unit* - IMU) e uma câmara para localização e monitorização em empilhadores é apresentada em [22]. O autor utilizou testes em cenários de *Light-of-Sight* (LOS) e de *Non-Light-of-Sight* (NLOS). Demonstrou que no caso de LOS a tecnologia UWB possui bons resultados mas quando colocada em situação de NLOS os resultados possuem maior erro. Com a utilização da fusão sensorial e também filtragem dos valores foi possível melhorar os resultados, confirmando valores de erro em média entre 10 e 20 centímetros na posição 2D, como indicado pelo fabricante da tecnologia UWB utilizada.

Tabela 1: Comparação das tecnologias mais comuns utilizadas para SLI. Valores de precisão são valores aproximados.

| Tecnologia | Precisão | Observações |
|-------------------|----------|--|
| Visão [3] | < 0.5m | Custo influenciado pela qualidade da câmara. Necessário operar em LOS. Requer elevado processamento para utilização de algoritmos na análise de <i>frames</i> em tempo real. |
| GPS [10] | 6-10m | Cobertura global. Múltiplos equipamentos equipados com esta tecnologia (<i>smartphones</i> , carros,...). A localização deteriora-se quando em ambientes interiores. |
| Infravermelho [2] | 1-2m | Adequada para pequenos espaços e/ou deteções próximas. Equipamentos de baixo custo mas com reduzida resiliência a interferências externas. |
| Ultrassons [5] | 3 cm-1 m | Opera bem em pequenas distâncias. Em grandes áreas é necessário elevado número de dispositivos. Sujeito a falta de cobertura devido a obstáculos e paredes. |
| RFID [10] | 1-2m | Capacidade de penetrar objetos não metálicos (não necessita de LOS entre dispositivos). Possui baixo consumo de energia e é simples de operar. |
| Rede móvel [6] | 5m | Banda licenciada/segura e cobertura elevada. Situações de interior resultam num erro elevado. Bastantes dispositivos possuem esta tecnologia. |
| WiFi [9] | 1-5m | Boa cobertura no interior dos edifícios e elevado número de dispositivos equipados com esta tecnologia. Tecnologia mais adequada para transferência de dados. |
| Bluetooth [9] | 2-5m | Boa cobertura nos edifícios. Tecnologia utilizada em diversos dispositivos como <i>smartphones</i> ou até eletrodomésticos. Muito utilizada para localização em ambientes interiores. |
| ZigBee [9] | 3-5m | Baixo consumo, baixo custo, baixa taxa de transmissão de dados e susceptível a interferências resultantes de NLOS. |
| UWB [10] | 10 cm | Capacidade de penetração de objetos. Baixa latência. Capacidade de resistir a interferências resultantes de multi-caminho. Não interfere com outros sistemas RF. |

DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo, são abordados os equipamentos utilizados, os algoritmos e metodologias implementadas. Inicialmente é efetuada a descrição dos equipamentos utilizados, da utilização da tecnologia selecionada para SLI e o desenvolvimento das ferramentas de suporte ao trabalho. Finalmente, a caracterização e análise do ambiente de testes é apresentada.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO E FERRAMENTAS

A descrição do equipamento e local de implementação são apresentadas de seguida. Em relação aos equipamentos utilizados, descrevemos não só os dispositivos do kit de desenvolvimento MDEK1001 mas também os equipamentos de medida utilizados para obter os valores reais de distâncias e posição. A seguir descrevemos o local de implementação e metodologias utilizadas para execução desta tarefa.

3.1.1 *Decawave MDEK1001*

Foi decidido usar equipamentos UWB da empresa *Decawave*. Esta decisão foi baseada na existência de documentação do fabricante com extensão e qualidade relevante e nas diversas referências existentes aos seus produtos em trabalhos relacionados. Nestes trabalhos apresentam-se resultados promissores na utilização da tecnologia deste fabricante. A possibilidade de adquirir *kit's* de desenvolvimento, evitando a necessidade de elaborar *hardware* específico para os testes, de modo a acelerar o desenvolvimento deste estudo. O *kit* de desenvolvimento adquirido foi o *MDEK1001*, recomendado para um SLI em tempo real e para uma rápida implementação no local de testes. O *kit(Decawave's UWB evaluation kit)*, inclui 12 dispositivos (DWM1001-DEV) baseados no módulo DWM1001. Os dispositivos DWM1001-DEV incorporam o módulo de comunicação DWM1001, usado para o protocolo de comunicação UWB, indicado para determinar distâncias através do tempo de voo dos sinais. Inclui também um microprocessador Nordic Semiconductor NRF52832 IC, que contém

um ARM® Cortex-M4F de 64MHz, que incorpora o *firmware PANS2.0* e que possibilita a conectividade por *Bluetooth*. Outros constituintes principais do dispositivo DWM1001-DEV são botões, *LED's*, conector USB, acelerómetro de três eixos (STM LIS2DH12TR) e um J-Link On Board. É possível alimentar o dispositivo com uma pilha 3.7V RCR123A, com uma bateria recarregável 16340 ou usar a porta USB para alimentar diretamente. Se se pretender conectar a um *Raspberry Pi*, este possui um *header* próprio para interligar diretamente com o conector. Cada dispositivo vem com o *firmware* de “origem” referenciado como PANS2.0, que oferece a capacidade de poder implementar os sistema de localização em tempo real - *Real-Time Localization System* (RTLS). Os dispositivos podem ser configurados como âncoras ou como *tags*. Estas configurações podem ser efetuadas através de comunicação por Bluetooth, usando a aplicação *Decawave DRTLS Manager* para dispositivos *Android*, ou através da comunicação com porta *série* recorrendo a comandos específicos. Os dispositivos possuem ainda outras configurações possíveis, tais como usar um dispositivo apenas como intermediário de todas as comunicações (*Listener*) UWB, ou como *gateway*, quando pretendido estender/interligar dois sistemas diferentes. Importante referir que a documentação associada para implementar as diferentes configurações possíveis do sistema é extensa. Para o funcionamento do módulo numa das duas últimas configurações referidas anteriormente, algumas alterações ou equipamentos adicionais são necessários, *e.g.* recorrendo a um *Raspberry Pi 3, Model B* interligado a um DWM1001-DEV.



Figura 9: Dispositivo DWM1001 pertencente ao kit de desenvolvimento MDEK1001 - Decawave

Através do PANS2.0, é possível configurar os dispositivos e implementar o SLI, utilizando os métodos anteriormente referenciados. As principais características do kit MDEK1001 e do PANS2.0 documentadas pelo fabricante são:

- Apenas as *tags* determinam as distâncias e calculam a posição. Necessitam de um mínimo de 3 distâncias diferentes, obtidas através do método RTOF para determinar a posição, usando o *Location Engine*.
- Máxima taxa de aquisição da localização da *tag* - 10Hz.
- Em condições de LOS, podem comunicar até aproximadamente 60 metros de distância.
- Precisão nos eixos X e Y de cerca de 10cm.
- Capacidade de usar mais *tags* em simultâneo dependendo da frequência de atualização das posições estimadas, configuradas no sistema.
- Possibilidade de estender o sistema para um formato centralizado com a utilização das restantes ferramentas recomendadas na documentação (*Raspberry Pi*, não incluído no kit, a ser usado como *gateway*).
- Parâmetros do UWB estão fixos em Canal 5 (6.5GHz), *bitrate* a 6.81Mbps, preâmbulo de 128 e PRF de 64MHz. Associado ainda a este ponto, importa referir que a PCB antena se encontra adaptada para o canal 5 nestes dispositivos.

Em resumo, o kit MDEK1001 oferece a possibilidade de integrar o sistema quase de imediato sem qualquer necessidade de programação adicional, em que apenas é necessário fixar os dispositivos que serão usadas como âncoras, definir as configurações e as suas coordenadas (x,y e z) em relação ao local de implementação e configurar os dispositivos que serão usados como *tag*. Com a versão original de *firmware* e juntamente com uma conexão a um computador ou através de um dispositivo *Android*, é possível então obter uma posição estimada x, y e z. Usando a aplicação correspondente, é possível parametrizar algumas das configurações, nomeadamente a frequência de aquisição, habilitar a localização quando detectado movimento, no entanto algumas configurações associadas à tecnologia UWB não são possíveis de configurar directamente na aplicação.

O *firmware* original (PANS2.0), limita o controlo sobre o dispositivo, não oferecendo a possibilidade de alterar as parametrizações associadas à comunicação UWB. O modo como efetua o protocolo de comunicação com as âncoras e como a posição é determinada está "bloqueado". Adicionalmente, não é possível configurar um sistema que use mais do que 4 âncoras para determinar posições. Dado que o PANS2.0 não possui código aberto para consulta (propriedade intelectual pertencente à *Decawave*) e no âmbito deste trabalho, foi desenvolvido *firmware* por forma a colmatar esta

necessidade. A *Decawave* disponibiliza um guia e documentação adicional caso o utilizador pretenda desenvolver a sua própria solução, de *hardware* e de *firmware*.

Para desenvolver código para os dispositivos utilizados do kit MDEK1001, é necessário implementar código em linguagem C ao nível da manipulação dos registos do processador ARM e programar os dispositivos através do programador J-link, utilizando o (IDE) Segger Embedded Studio. São necessárias duas "versões diferentes" de *firmware*, uma para os dispositivos a operar como *tag* e outra os dispositivos a operar como âncora. Com esta programação de baixo nível é possível atingir uma maior de configuração das diferentes parametrizações das comunicações UWB. As principais características comunicação UWB configuráveis no módulo DWM1001 são:

- Preâmbulo (*preamble*) - o preâmbulo pode ser configurado em 1 das seguintes 8 opções: 4096, 2048, 1636, 1024, 512, 256, 128 e 64 símbolos. Um preâmbulo menor resulta em mensagens mais curtas e conseqüentemente uma comunicação mais rápida, mas por outro lado, reduz a capacidade de operar em distâncias maiores. De referir também que valores de preâmbulo mais elevados traduzem num maior tempo necessário para efetuar uma rotina de cálculo de distância através do *Two-way-ranging* (TWR) por exemplo.
- Taxa de dados (*bitrate*) - existem 3 modos possíveis para configurar o *bitrate* que são: 110kbit/segundo, 850kbit/segundo e 6.81Mbit/segundo. Um maior *bitrate* resulta em comunicações mais rápidas mas podem ser limitadas em termos de distâncias de operação.
- Canal (*channel*) - é possível definir o canal a usar entre 6 canais de UWB não sobrepostos, como apresentado na Tabela 2. Cada canal usa frequências diferentes e não interfere nem comunica com outro diferente. Portanto, para que os dispositivos comuniquem entre si, é necessário que estes estejam a usar o mesmo canal de frequência. Outro aspeto relevante, é o facto de frequências mais baixas (canais mais baixos) resultarem na capacidade em comunicar a distâncias superiores. É importante referir que estes canais devem ser seleccionados tendo em conta as várias frequências utilizadas por outros sistemas ou dispositivos no local de implementação mas também devido a adaptação do *hardware*.
- Frequência de repetição dos pulsos (*Pulse Repetition Frequency* - PRF) - é possível usar dois valores de PRF de 16MHz ou 64MHz. Estas opções não afetam as comunicações e podem ser usadas em simultâneo sem que se interfiram.

Tabela 2: Canais disponíveis para o uso em UWB [16]. Nesta tabela f_c representa a frequência central e BW representa a largura de banda.

| Canal | f_c [MHz] | Banda (BW)[MHz] | Observações |
|-------|-------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 1 | 3494.4 | 3244.8-3744(499.2) | |
| 2 | 3993.6 | 3774-4243.2(499.2) | Para longas distâncias |
| 3 | 4492.8 | 4243.2-4742.4(499.2) | |
| 4 | 3993.6 | 3328-4659.2(1331.2) | |
| 5 | 6489.6 | 6240-6739.2(499.2) | Sem restrições em diversos países |
| 6 | 6988.8 | 6739.3-7238.4(499.2) | Não suportado de momento |
| 7 | 6489.6 | 5980.3-6998.9(1081.6) | |

Com as diferentes combinações é possível obter vários modos de funcionamento. Por exemplo, para distâncias pequenas, a utilização de um preâmbulo baixo (64 símbolos) e com um *bitrate* elevado (6.81Mbps) deverão ser implementadas. Em contra partida, para distâncias elevadas, a combinação de um preâmbulo elevado (4096 símbolos) com um *bitrate* baixo (110kbps) deverá ser usada. Da mesma forma, também deve ser escolhido o canal a utilizar conforme a necessidade do nosso sistema.

Os dispositivos DWM1001-DEV, vêm calibrados de fábrica [23] e os valores de reajuste do *clock* (*Crystal Oscillator Trim*), os valores de *Antenna Delay* e de potência de transmissão estão alocados na memória *One Time Programmable* (OTP) e apenas é necessário aceder aos valores e "carregar" nos registos correspondentes. A calibração é um aspeto muito importante e crucial para que o SLI, munido da tecnologia UWB da *Decawave*, possua bons resultados. Para tal o fabricante recomenda a calibração dos principais pontos: *Antenna Delay*, *Crystal Oscillator Trim* e a potência de transmissão. Aliadas a estas calibrações, existem ainda algumas metodologias que se podem implementar por forma a reduzir o erro e impacto externos, por exemplo, a diferença de temperatura ao longo do tempo que pode causar desvio do *clock* ou até o valor de *Antenna delay*, que conseqüentemente gera um erro residual nas distâncias calculadas. Estas metodologias e calibrações são relevantes, quando se pretende desenvolver *hardware* usando tecnologia UWB da *Decawave*.

As principais calibrações são:

- *Crystal Oscillator Trim* - valor utilizado para definir a comutação entre os condensadores existentes em paralelo com o oscilador e desta forma ajustar a frequência. Como estes dispositivos necessitam de obter temporizações com

elevada precisão, é importante que os valores dos osciladores sejam corrigidos para que desta forma, o desvio do *clock* não introduza erro ao obter os tempos da duração do tempo de voo do sinal nas comunicações, *vide* Figura 10.

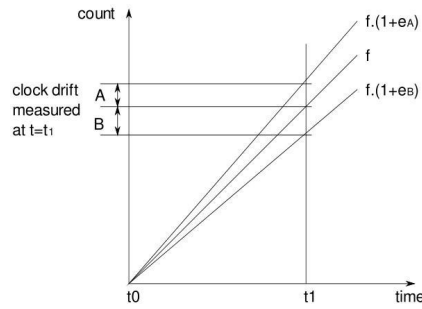


Figura 10: Representação do *Clock-Drift* entre dispositivo A e B [7]

- **Potência de Transmissão** - controlo sobre a potência de transmissão, respeitando os regulamentos da densidade espectral permitida (específicos por regiões do globo ou países) e ao mesmo tempo maximizar a capacidade de operar a maiores distâncias. O valor que vem de referência para a calibração é o valor programado em a potência de transmissão está no limite de $-41.3dBm/MHz$.
- **Antenna Delay** - designado desta forma pelo fabricante, este termo refere-se ao facto do tempo de voo real ser inferior ao tempo de voo medido tendo em conta o instante temporal atribuído ao envio e à receção das mensagens. Como referido pelo próprio fabricante, o tempo medido diretamente a partir do instante temporal associado pelo microcontrolador, além do tempo de voo, inclui, por exemplo, o tempo de propagação do sinal através do circuito[24]. O processo de calibração permite remover este erro [25], melhorando a estimativa do tempo de voo, como ilustrado na Figura 11. Este valor poderá diferir de dispositivo para dispositivo.

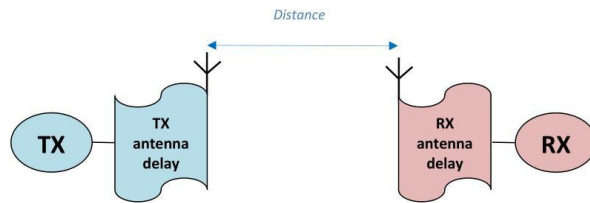


Figura 11: Representação do *Antenna Delay* [7]

Inicialmente, no processo de calibração, são lidos os valores na memória respectiva e carregados os valores nos registos de configuração do dispositivos para que seja possível obter a calibração elaborada de fábrica.

Como descrito anteriormente, ainda é possível efetuar outras correções, nomeadamente correções dependentes da temperatura ou do nível de tensão de alimentação dos dispositivos. As variações reportadas pelo fabricante são respectivamente $2.15 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $5.35 \text{ mm } \text{V}^{-1}$. Visto que nas experiências conduzidas não se monitorizou estes valores, não se efetuou qualquer afinação tendo em conta a temperatura ou tensão de alimentação dos dispositivos. Adicionalmente, existem ainda outras parametrizações associadas à configuração dos dispositivos que para efeitos práticos foram as recomendadas pelo fabricante. Por exemplo, o valor utilizado de *threshold* para deteção de uma comunicação UWB, foi o recomendado pelo fabricante.

Outro fator que influencia o cálculo da distância é o $Bias_{Correction}$, que relaciona a potência do sinal com um valor residual de erro na distância como apresentado na Figura 12. Idealmente, não deveria existir qualquer relação entre a potência de sinal e o cálculo do tempo de voo de um sinal recebido. O fabricante refere que existe uma relação e que se deve implementar uma correção, subtraindo ao valor da distância o fator de correção[7], propondo duas formas de se obter esse valor: ou se utiliza uma tabela padrão (Tabela 3), em que os valores a corrigir são valores de referência disponibilizados pela *Decawave*, consoante as características utilizadas nas comunicações UWB, ou o utilizador elabora os testes necessários para obter uma tabela própria, onde obtém para as várias distâncias o valor de RSL e analisa o valor a corrigir em cada distância.

$$\text{Distância} = \text{Distância}_{medida} - Bias_{Correction} \quad (7)$$

A equação 7, demonstra como é corrigida a distância medida usando o $Bias_{Correction}$ da tabela de correção referente ao valor de RSL que estamos a obter no recetor do dispositivo que vai determinar a distância(*tag*). Tendo em conta que a comunicação se dá em LOS, o valor de RSL varia dependendo com a distâncias assim como o valor a corrigir como de acordo com a Figura 12.

Finalmente, é importante referir que existem outros pontos importantes associados a esta tecnologia com impacto no seu funcionamento. Sendo uma tecnologia que utiliza radiofrequência, é natural que os dispositivos estejam sujeitos a perturbações, como a ocupação da zona de Fresnel e adicionalmente características associadas à antena utilizada, mais propriamente, o diagrama de radiação da antena, que também são relevantes. Segundo a documentação associada ao módulo DWM1001

Tabela 3: Valores *standard* para correção de acordo com os valores de RSL fornecida pela documentação da Decawave [7].

| RSL[dBm] | PRF 16 MHz (500 MHz) [cm] | PRF 64 MHz (500 MHz) [cm] |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|
| -61 | -19.8 | -11.0 |
| -63 | -18.7 | -10.5 |
| -65 | -17.9 | -10.0 |
| -67 | -16.3 | -9.3 |
| -69 | -14.3 | -8.2 |
| -71 | -12.7 | -6.9 |
| -73 | -10.9 | -5.1 |
| -75 | -8.4 | -2.7 |
| -77 | -5.9 | 0.0 |
| -79 | -3.1 | 2.1 |
| -81 | 0.0 | 3.5 |
| -83 | 3.6 | 4.2 |
| -85 | 6.5 | 4.9 |
| -87 | 8.4 | 6.2 |
| -89 | 9.7 | 7.1 |
| -91 | 10.6 | 7.6 |
| -93 | 11.0 | 8.1 |

da *Decawave (DWM1001 - datasheet)*, esta descreve a forma de como a antena se comporta, indicando que esta é polarizada verticalmente e que quando esta é colocada numa orientação vertical se consegue obter uma irradiação aproximadamente omnidirecional. No caso de não ser possível, este fator poderá ter impacto nos limites nas distâncias ou até induzir uma posição com maior erro. É recomendado o afastamento de superfícies metálicas ao redor dos dispositivos de pelo menos 20 centímetros, de modo a reduzir o impacto nas comunicações.

3.1.2 Equipamentos de medição

Para determinar os valores reais (*ground-truth*) das distâncias e das posições no formato de eixos cartesianos, foram utilizados outros equipamentos para controlo e validação de medidas.

Foi utilizado um teodolito para obter as coordenadas dos vários elementos do nosso SLI no formato de eixo cartesiano. Este equipamento, tem uma precisão de

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO E FERRAMENTAS

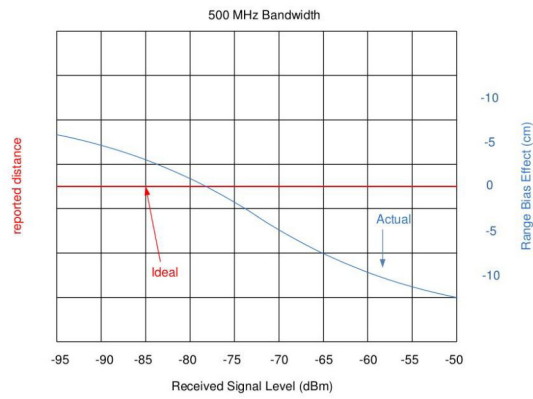


Figura 12: Representação do *Bias Correction* [7]

2 milímetros e sem a utilização do refletor tem um alcance de aproximadamente 400 metros. As medições angulares (horizontal - Hz e vertical - V) possuem uma precisão que varia entre 1 *mgon* e 2 *mgon*. Com este equipamento é então possível retirar os pontos de localização com referência a este equipamento, *vide* 13.



Figura 13: Teodolito utilizado para as obter as coordenadas (x, y, z) dos pontos de referência em testes.

Foi também utilizado um medidor de distâncias a laser (DEXTER 30M - Figura 14), com capacidade de medir distâncias até 30 metros, obtendo medições na escala dos milímetros (precisão de 2 milímetros a cada 10 metros). Este equipamento foi principalmente utilizado para determinar distâncias e para comparar com as obtidas pelos dispositivos evitando a necessidade de mover o teodolito da sua posição calibrada.



Figura 14: Medidor a laser DEXTER30M

3.2 APLICAÇÕES DE SOFTWARE

Nesta secção serão descritas as ferramentas de *software* desenvolvidas para a realização dos testes. Primeiro, será efetuada um pequeno resumo sobre o desenvolvimento efetuado. De seguida, é abordado o *firmware* desenvolvido para integrar os dispositivos UWB, nomeadamente o protocolo de comunicação implementado e também o processo de calibração elaborado.

3.2.1 Software *de suporte*

Tendo em conta todas as características abordadas anteriormente, foi desenvolvido código para integrar os dispositivos e adaptar às necessidades dos testes a serem efetuados. Todo o *software* desenvolvido está presente no repositório que acompanha este trabalho, onde é possível consultar tanto o *firmware* desenvolvido para os dispositivos UWB utilizados como também todos os *scripts* de captura e análise de dados¹.

As configurações gerais usadas para a comunicação UWB foram:

- Canal 5 - centro de frequência a 6489.6 MHz com 499.2 MHz de largura de banda
- Preâmbulos de 128 e 1024
- *Bitrate* de 6.81Mbps para o preâmbulo de 128 e 110kbps para o preâmbulo de 1024
- PRF de 64MHz

¹ Repositório - https://github.com/ipleiria-robotics/indoor_positioning_uwb

As configurações do canal e do PRF, foram mantidas durante os vários testes, dado que o próprio *hardware* e antena estão adaptados para trabalhar com estes valores e encontram-se calibrados de fábrica [23]. Foram definidos dois modos de operação que dependem apenas do preâmbulo e da taxa de dados a usar. Para os dois modos de configuração, os registos associados também foram reajustados para que as configurações estejam nos valores corretos. Para as duas configurações de protocolo UWB implementadas, a que se considerou a principal é a que possui um preâmbulo de 128 e *bitrate* de 6.81Mbps, sendo a alternativa apenas usada caso de a configuração principal não funcionar nas melhores condições.

A arquitectura para o SLI proposto neste trabalho é demonstrada na Figura 15 onde para o funcionamento do mesmo é necessário conectar um computador via comunicação *série* com a *tag*. A comunicação entre a *tag* e as restantes âncoras será efetuada por comunicação UWB.

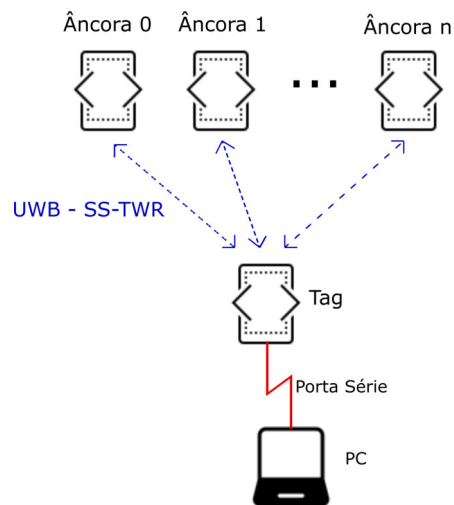


Figura 15: Esquema simplificado do SLI proposto.

Ambas as âncoras e a *tag* possuem versões diferentes de *firmware*, devido às funções diferentes que cada executa. Na Figura 16 encontra-se de uma forma simplificada as capacidades do *firmware* desenvolvido.

A função das âncoras é simplesmente responder aos pedidos efetuados pela *tag* através da comunicação efetuada via UWB. A *tag*, possui mais opções, apenas as mais relevantes se encontram representadas Figura 16. Para uma melhor compreensão, remetemos o autor novamente ao repositório associado.

O protocolo de comunicação UWB desenvolvido foi adaptado dos exemplos fornecidos pelo fabricante (*Decawave*). O protocolo de obtenção das distâncias

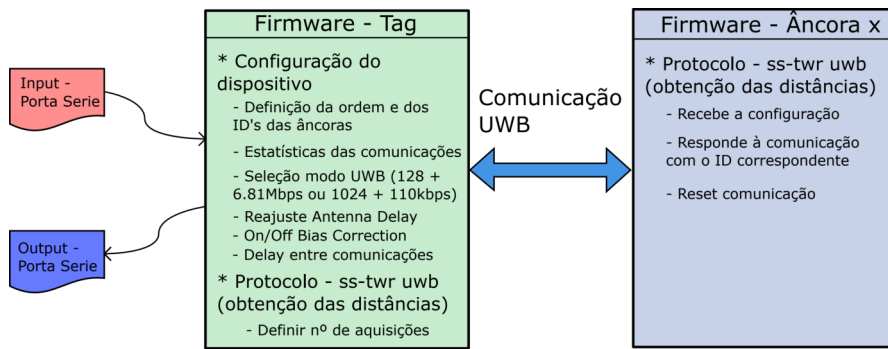


Figura 16: Esquema representativo do *firmware* desenvolvido para as âncoras e *tag*.

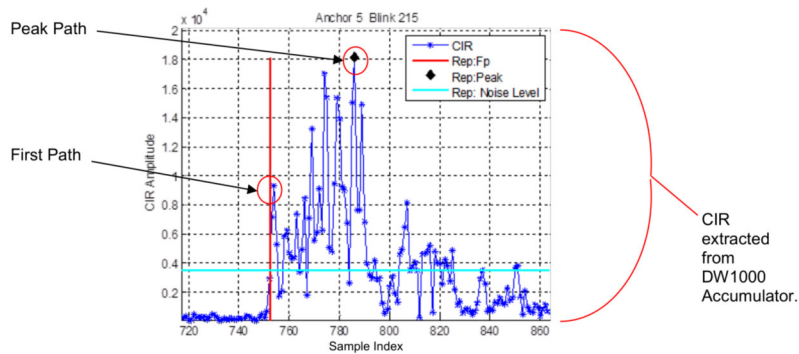


Figura 17: Exemplo de representação de CIR no receptor.

encontra-se apresentado a Figura 18. Adicionalmente com o desenvolvimento do *firmware* da *tag* é possível obter a resposta em canal (CIR - Figura 17) das respostas recebidas, força de sinal (*First-path Signal Level* - FSL) e média (*Received Signal Level* - RSL), dados estatísticos, definir as âncoras e a ordem com que se pretende comunicar com as mesmas, definir o protocolo a utilizar para as comunicações, alterar o valor de *threshold* para comunicações NLOS e finalmente definir o número de aquisições de distâncias a efetuar pela *tag*.

Usando a comunicação *série* entre a *tag* e um computador, conseguimos interagir com o *firmware* personalizado da *tag* e definir as opções de funcionamento. Em relação ao *firmware* desenvolvido para a âncoras, este apenas responde aos pedidos efetuados e alterna entre protocolos através do envio de mensagens da *tag*.

Cada âncora responde a uma mensagem com um *ID* (Identidade) específico a ser preenchido no cabeçalho de cada mensagem a enviar pela *tag*. Assim, para comunicar com a âncora 0, é necessário que o *ID* da mensagem seja 0 e assim sucessivamente para as restantes âncoras. Os resultados das medições das distâncias

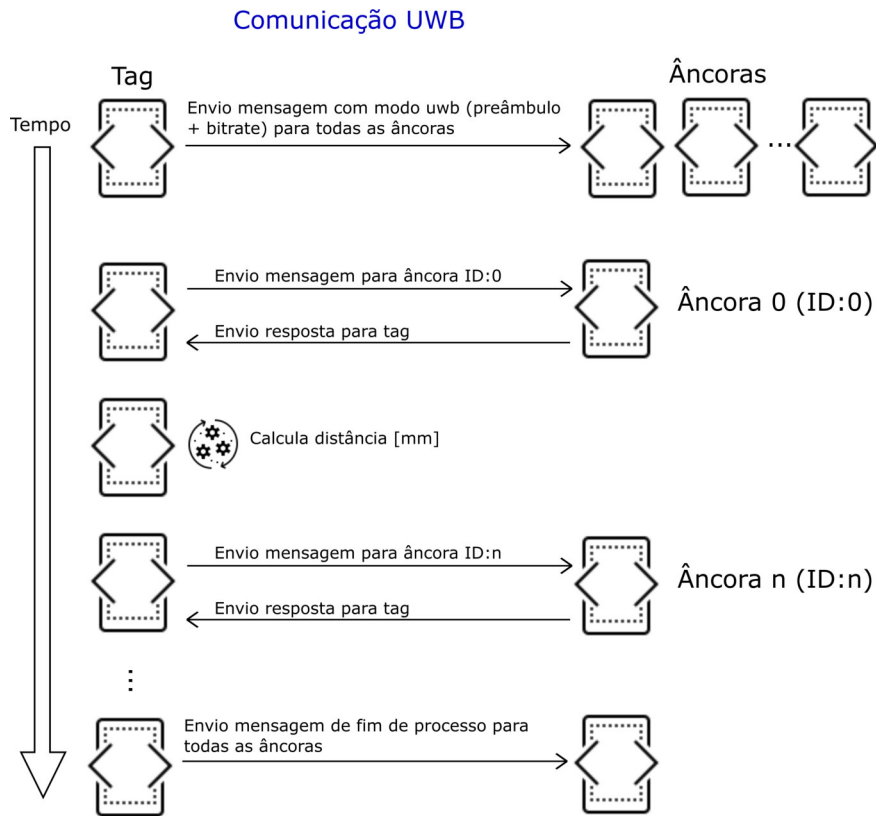


Figura 18: Exemplo da comunicação UWB utilizado entre a *tag* e as âncoras.

e restantes medições (RSL, etc) recolhidas são impressas na porta Série da *tag* pela ordem definida e em formato *csv*.

O tratamento dos dados não é efetuado na *tag* mas posteriormente. Um ciclo completo de testes ocorre em duas fases: na primeira é efectuada a recolha dos dados com os equipamentos UWB e medição de distâncias/posição e, numa segunda fase, interpretados os dados guardados.

Para o processo de recolha e análise dos dados foram elaborados os respetivos *scripts* em linguagem *Python 3*. Nestes serão então implementados os algoritmos para estimar as posições e efetuar as análises estatísticas correspondes ao erro, tanto para as distâncias como para as posições. O *software* desenvolvido está presente no repositório que acompanha este trabalho. Mais informações encontram-se no anexo [A](#).

3.2.2 Protocolo de comunicação UWB

Para o desenvolvimento do protocolo de comunicação, a *Decawave* disponibiliza exemplos de código para executar uma comunicação UWB simples entre dois dispositivos. A partir dos exemplos referenciados, foi desenvolvido código para implementar o protocolo de comunicação UWB. O modo implementado foi o RTOF, não sendo necessário implementar sincronismo nas âncoras, as distâncias serão determinadas apenas na *tag*. o fabricante *Decawave* denomina esta forma de operar de *Two-way-ranging* (TWR). Neste formato, as âncoras apenas precisam de ser alimentadas através de pilha ou cabo de alimentação (transformador e conversor para porta *USB*) e utilizar o *firmware* desenvolvido. Adicionalmente, para determinar as distâncias apenas o *clock* da *tag* contabiliza o tempo absoluto da "viagem" do sinal. Para se obter as distâncias, usando o método RTOF, é necessário implementar a equação 4, sabendo o tempo de voo dos sinais na comunicação e multiplicando-o com a velocidade da luz.

Relembrando a Equação 4, para determinar o cálculo das distâncias, o valor t_1 é obtido no momento em que o dispositivo *DWM1000 initiator* envia a mensagem para o dispositivo *DWM1000 responder*. A mensagem é devolvida no sentido contrário pelo dispositivo *DWM1000 responder*, e no momento em o dispositivo *DWM1000 initiator* recebe a mensagem, é registado o tempo t_2 , ver Figura 19.

O valor de t_{reply} é um valor de tempo definido no *firmware* utilizado na âncora *DWM1000 responder*. Este é usado pela âncora para efetuar um *delay* antes do envio

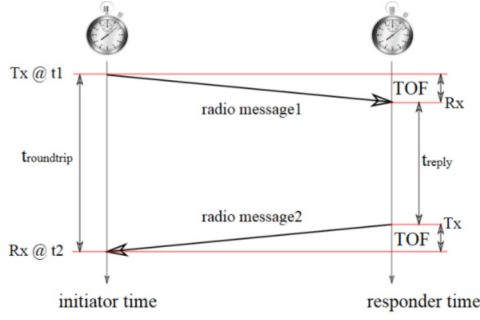


Figura 19: Representação do método RTOF [7]

da resposta ao pedido à *tag*. Sabendo o tempo de resposta (t_{reply}) do dispositivo *DWM1000 responder* é então possível obter o RTOF ou *Single-sided Two-way Ranging* (SS-TWR). Inicialmente o fabricante recomendava um método denominado de *Doubled-sided Two-way Ranging* (DS-TWR) para mitigar o *Clock-drift* (desacerto do relógio) existente ao longo do tempo. Com este método existia uma troca de 4 mensagens para determinar a distância entre dois dispositivos. Com a implementação da correção do *Clock-drift* na *tag*, o fabricante demonstrou que os resultados eram praticamente idênticos utilizando o SS-TWR. Adicionalmente, apenas 2 mensagens são necessárias para determinar uma distância. Desta forma, a implementação do SS-TWR é recomendada pelo fabricante - [7].

Com a aplicação do SS-TWR e interpretando a Figura 19 resulta a equação 8

$$T_{prop} = \frac{T_{round} - T_{reply}}{2} \quad (8)$$

onde o termo T_{round} é representado por $t_2 - t_1$, que é a diferença dos tempos de envio e recepção da mensagem na *tag* e o termo T_{reply} que é o tempo que demora o dispositivo (âncora) a responder à *tag*. Desenvolvendo a equação 8 obtemos:

$$RTOF = \frac{(res_{rx} - poll_{tx}) - (resp_{tx} - poll_{rx})}{2} \quad (9)$$

Os valores obtidos na *tag* numa comunicação são os valores do *clock* na transmissão da primeira mensagem $poll_{tx}$ e os valores do *clock* na recepção da mensagem de resposta res_{rx} . Na âncora é obtido o valor do *clock* no instante que a primeira mensagem é recebida ($poll_{rx}$) e o valor do *clock* na transmissão da resposta ($resp_{tx}$) para a *tag*.

É importante referir que o T_{reply} na âncora deve ser programado para ter o menor impacto possível na estimativa das distâncias e que a comunicação de dados não seja afetada. Este tempo de resposta é utilizado quando existe uma receção de uma mensagem na âncora, onde o *delay* é usado para garantir que o tempo de saída do sinal (envio de resposta à *tag*) seja feito sempre com o mesmo atraso. Um tempo programado superior no caso da resposta pode levar a *tag* a descartar por *timeout* na receção do sinal. Resumindo, o cálculo do $resp_{tx}$ na âncora é indicado na equação 10.

$$resp_{tx} = poll_{rx} + Delay_{programado} + Antenna_{Delay} \quad (10)$$

Adicionalmente o valor de *Antenna Delay* é adicionado ao cálculo automaticamente quando os valores dos tempos são obtidos através da leitura dos registos associados, não sendo necessário integrar no cálculo do RTOF.

Finalmente, falta ter em conta o valor do *Clock-Drift* existente nas comunicações. Ao longo do tempo de funcionamento dos dispositivos, os valores de *clock* destes, podem sofrer desvios devido a fatores como a variação da temperatura, entre outros. Estas diferenças têm impacto na obtenção dos tempos de aquisição das mensagens. De acordo com o fabricante *Decawave*, a forma de como é possível corrigir esta diferença, rege-se pela equação 9:

$$RToF = \frac{(resp_{rx} - poll_{tx}) - (resp_{tx} - poll_{rx}) \times (1 - ClkOffset_{Ratio})}{2} \quad (11)$$

O valor de *ClkOffsetRatio* é obtido através da leitura de num registo específico que contem o valor de correção. Desta forma é então possível mitigar os desvios dos valores de desvio a que os *clock's* dos dispositivos podem estar sujeitos.

Com a equação 11 é então possível obter o tempo de voo de uma comunicação efetuada entre uma *tag* e uma âncora. Para obter a distância é utilizada a fórmula 2.

O *Bias Correction*, que como anteriormente descrito, deve ser utilizado para corrigir os valores de distância calculados conforme o valor de potência de sinal recebido na *tag*. Para tal, foi utilizada a Tabela 3 como referência, utilizando os valores de padrão para o PRF de 64MHz. Sendo assim, a distância final é obtida através da equação:

$$Distance = (RTof \times c) + Bias_{Correction} \quad (12)$$

3.2.3 Sistemas de calibração

Com o *firmware* desenvolvido para a *tag* e para as âncoras, que inclui o protocolo de medição das distância e as configurações adicionais, procurou-se avaliar as medições das distâncias a cada âncora. Esta avaliação é necessária para perceber se o valor obtido das distâncias está em concordância com o valor real ou pelo menos, se possui um erro dentro do valor estimado pelo fabricante. Foi observado um *offset* do erro nos valores das distâncias obtidas. Após algumas análises, foi determinado que este erro era proveniente do *Antenna Delay* e que era necessário efetuar um reajuste e reavaliar o erro novamente.

Foi necessário elaborar testes de calibração aos dispositivos, utilizando distâncias específicas de acordo com as características da comunicação UWB (canal e *prf*) e ajustando o valor de *Antenna Delay* de forma que a distância medida esteja aproximada com o valor da distância real.

A distância de referência de calibração indicada para a comunicação UWB utilizada é a de 5.015 metros. Para análise, são retiradas 2000 medições de distâncias a cada âncora e analisados os dados estatísticos do erro. O objetivo é tentar reduzir o erro médio por forma que este seja o mais baixo (perto de 0 mm). A Figura 20 representa de forma simples do processo elaborado para a calibração.

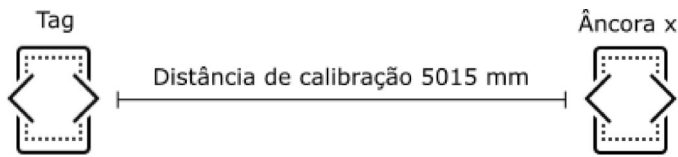


Figura 20: Representação do método para o reajuste do valor do *Antenna Delay*

Foi implementado o reajuste através da adição de um *offset(Delay_{Corr})* por forma a compensar o valor de *Antenna Delay*. Assim, como a Equação 13 demonstra, é efetuada uma correção ao valor do tempo de voo da comunicação determinado na *tag*. Efetuado para todas as âncoras, é obtido para cada comunicação um valor nas unidades utilizadas pelo dispositivo que convertem o tempo num valor número de correção. Este valor é aproximado por sucessivas tentativas por forma a que o valor médio do erro das 2000 medições seja aproximado a 0 mm.

$$RToF_{\text{corrigido}} = RToF + Delay_{\text{Corr}} \quad (13)$$

Após a correção do valor calculado de tempo de voo, é possível determinar a distância da mesma forma como foi demonstrado anteriormente.

De forma analisar os dados estatísticos das distâncias, foi adotado para representar a medida distância a letra d . Desta forma e daqui para a frente iremos utilizar esta notação para facilidade de amostragem dos dados.

Para determinar o erro da distância ($erro_d$):

$$erro_d = d_{\text{real}} - d_{\text{medida}} \quad (14)$$

É efetuado o cálculo da média do erro das distâncias:

$$\overline{erro_d} = \frac{1}{n} \sum (erro_d) \quad (15)$$

Adicionalmente também se efetuou o cálculo do *Root Mean Squared Error* (RMSE) das distâncias.

$$RMSE_d = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (erro_d)^2} \quad (16)$$

Com os dados obtidos foi possível elaborar os histogramas representados na Figura 21 onde são comparados os resultados do erro com e sem reajuste do valor de *Antenna Delay*.

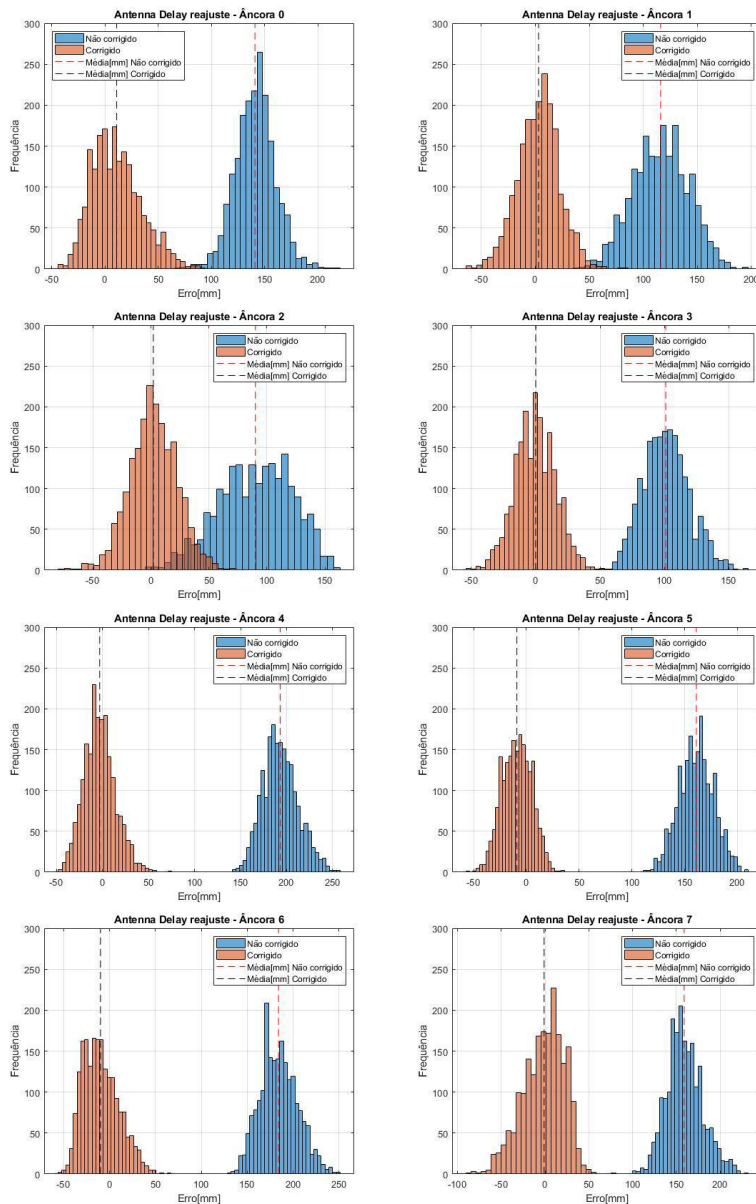


Figura 21: Comparação do erro das 2000 medições de distâncias com e sem a correção do *Antenna Delay* na distância de calibração de 5015 mm. O erro das medições com o *Antenna Delay* não corrigido estão representados a azul enquanto as corrigidas estão representadas a laranja.

É possível observar na Tabela 4 que o erro é menor após a correção do *Antenna Delay* no cálculo da distância e estão abaixo do referenciado pelo fabricante (aproximadamente 100 milímetros) - Figura 21. É importante referir que a correção que se

Tabela 4: Valores estatísticos obtidos durante o reajuste do *Antenna Delay*. Foram obtidos a média do erro ($\overline{erro_d}$), o desvio padrão (σ_{erro_d}) e o erro quadrático médio ($RMSE_{erro_d}$) para as 20000 medidas das distâncias a cada âncora não corrigidas e corrigidas.

| <i>Antenna Delay</i> | Estatística | Âncoras | | | | | | | |
|----------------------|--------------------------|---------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Não corrigido | $\overline{erro_d}$ [mm] | 141 | 116 | 90 | 101 | 193 | 161 | 184 | 159 |
| | σ_{erro_d} [mm] | 19 | 26 | 32 | 18 | 19 | 16 | 20 | 20 |
| | $RMSE_{erro_d}$ [mm] | 143 | 119 | 96 | 103 | 194 | 162 | 185 | 161 |
| Corrigido | $\overline{erro_d}$ [mm] | 11 | 3 | 2 | 0 | -3 | -9 | -10 | -1 |
| | σ_{erro_d} [mm] | 23 | 19 | 20 | 16 | 17 | 14 | 19 | 23 |
| | $RMSE_{erro_d}$ [mm] | 26 | 19 | 21 | 16 | 17 | 17 | 22 | 23 |

efetuou do *Antenna Delay* não remove a correção do *Bias correction* anterior, esta que deve continuar a corrigir os valores de distância após o cálculo das mesmas. É igualmente importante referir que a forma que se utilizou para reajustar o valor de *Antenna Delay* implica que para o caso de utilizar outro dispositivo como *tag*, será necessário realizar a calibração de novo.

Após todas implementações associadas ao *firmware* e à calibração dos dispositivos, os equipamentos estão condições de serem instalados para implementação do SLI para os testes a serem efetuados.

3.3 SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO EM AMBIENTE INTERIOR

Após o desenvolvimento do *firmware* para os dispositivos UWB, partiu-se para a análise do local de implementação do SLI e instalação efetuada das âncoras. No final será elaborada uma análise ao algoritmo utilizado para efetuar as estimativas da posição.

3.3.1 Local de implementação e colocação as âncoras

Para realização dos testes, o SLI foi implementado no laboratório de Robótica Avançada e Fábricas Inteligentes do edifício D da Escola Superior de Tecnologia e Gestão. As dimensões da sala são de 23 metros de comprimento, 7 metros de largura e 3 metros de altura (pé direito). A sala assemelha-se a um ambiente industrial, devido ao material e equipamento/máquinas no seu interior e ainda com secretárias em diversas zonas na sala. O teto da sala é em alumínio, com luminárias embutidas,

uma lateral da sala é constituída por janelas em todo o seu comprimento. É uma sala onde existem trabalhos com ferramentas e maquinaria, existem diversas tubagens metálicas fixas nas paredes (ar comprimido e água) e cablagem elétrica. Uma estrutura metálica também se encontra ao longo de grande parte do comprimento da sala, similar a uma ponte rolante industrial, mas de menores dimensões, que se encontra aproximadamente a meio da largura da sala e um pouco mais abaixo da altura máxima da sala - Figura 22.



Figura 22: Laboratório de Robótica Avançada e Fábricas Inteligentes do Politécnico de Leiria-ESTG. Foto panorâmica da sala.

Ao analisar este cenário, com janelas, estruturas metálicas abundantes, canalizações metálicas e obstruções da linha de vista, é provável existirem casos de multi-caminho, reflexões ou atravessamentos das ondas eletromagnéticas, e daí, resultarem em impactos na obtenção das distâncias pela *tag*.

A Figura 23 demonstra uma situação descrita onde aparecem os sinais s_1 , s_2 e s_3 resultantes de diferentes fenómenos. Estes representam três diferentes estados de: reflexões, atravessamento e linha de vista. Para o caso dos sinais s_2 , e s_3 estes terão um valor de tempo de voo superior, e conseqüentemente um maior erro na distância calculada.

Sendo este um cenário típico industrial, foi determinado colocar o SLI nesta mesma sala para avaliar a tecnologia UWB para SLI, e caracterizar e documentar o sistema, a sua implementação e resultados.

Um aspeto importante e crucial para este tipo de tecnologia possuir um bom desempenho é a colocação das âncoras. Este depende da geometria do edifício e da infraestrutura contida neste. A facilidade de fixação em alguns pontos com fontes de energia próximas, linha de vista para as restantes áreas ou a existência de divisões/paredes, altura máxima possível de instalação das âncoras, entre outros, são requisitos importantes a ter em conta quando se pretende instalar as âncoras. Nem sempre é possível obter os melhores locais de fixação das âncoras e conseqüentemente,

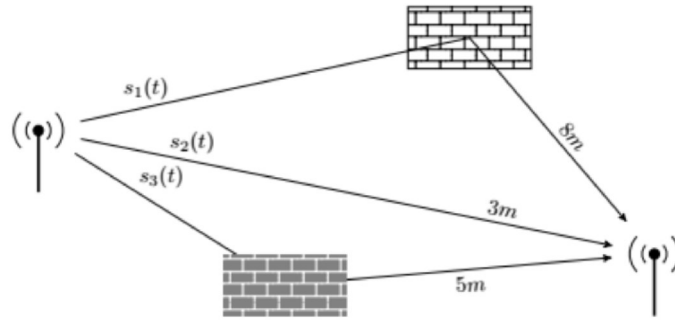


Figura 23: Exemplo de comunicação LOS(s_1), NLOS(s_3) e de multi-caminho(s_2) possíveis de existir num ambiente interior [26].

podendo o desempenho do sistema ser afetado. É importante então, procurar adaptar o SLI conforme as necessidades, ajustando sempre à realidade do local de instalação e procurando de uma forma razoável ter em conta os fatores anteriormente referidos. O fabricante do módulo DWM1001 (*Decawave*) e até outras entidades que utilizam esta tecnologia, elaboraram diretrizes de instalação por forma a reduzir o impacto das causas anteriores mencionadas. As principais diretrizes recomendadas para estes dispositivos pelo fabricante são:

- Colocar as âncoras numa posição em que possuam linha de vista LOS com os dispositivos a serem localizados. Para tal, a melhor forma será procurar uma altura elevada para a fixação das mesmas por forma a garantir este ponto. Possivelmente a sua fixação deverá ser efetuada em tetos ou pilares/paredes altas onde se consigam abranger uma boa área em linha de vista.
- Colocar os dispositivos orientados de forma vertical, antena no topo ou na base e evitar a presença de objetos metálicos ao redor do dispositivo. Este ponto é importante para garantir um bom desempenho da antena dos dispositivos. O mesmo se aplica à *tag* para que esta também possua bom desempenho. Isto deve-se à capacidade das antenas usadas de radiar nas diferentes direções, neste caso para estes dispositivos do *kit* adquirido da *MDEK1001*.
- Disposição das âncoras deverá ser feita por forma a que estas estejam ao redor da zona de localização e tendo em conta a dispersão entre elas. Uma dispersão reduzida entre as âncoras pode originar um impacto negativo no cálculo da posição. O mesmo princípio usado no GPS em relação à diluição de precisão (*Dilution of Precision - DOP*) dos satélites. Este conceito é utilizado para avaliar a geometria resultante do cálculo da posição tendo em conta os

pontos de referência (âncoras) utilizados e quantificar o impacto do erro na estimativa da mesma [27].

Seguindo o trabalho realizado por Sousa Silva deduziram-se as de diluição da precisão [28]:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} \quad (17)$$

$$a_{xi} = \frac{x_i - x_u}{d_i}, a_{yi} = \frac{y_i - y_u}{d_i}, a_{zi} = \frac{z_i - z_u}{d_i}, \quad (18)$$

Para i distâncias é possível obter para n âncoras:

$$H = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & 1 \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} & 1 \\ a_{x3} & a_{y3} & a_{z3} & 1 \\ \dots & & & \\ a_{xn} & a_{yn} & a_{zn} & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Assumindo que a solução possui $n > 4$ (pelo menos 4 âncoras), é possível utilizar:

$$K = (H^T H)^{-1} H^T \quad (20)$$

Finalmente, obtém-se a matriz de covariância que possui os coeficiente associados às componentes da DOP. É importante referir que não consideramos os erros adicionais nas distâncias e foi considerado que as âncoras se encontram fixas.

$$\text{cov}(\Delta x) = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 & \sigma_{xt}^2 \\ \sigma_{xy}^2 & \sigma_y^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_{yt}^2 \\ \sigma_{xz}^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_z^2 & \sigma_{zt}^2 \\ \sigma_{xt}^2 & \sigma_{yt}^2 & \sigma_{zt}^2 & \sigma_t^2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Com a matriz 21, obtém-se:

$$PDOP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}, HDOP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}, VDOP = \sqrt{\sigma_z^2} \quad (22)$$

Avaliando os resultados 22, se o coeficiente representar um valor baixo, indicam que existe uma boa diluição de precisão. Significa que para a posição estimada, os pontos de referência utilizados para o mesmo cálculo possuem uma boa dispersão e o erro na posição terá menos impacto.

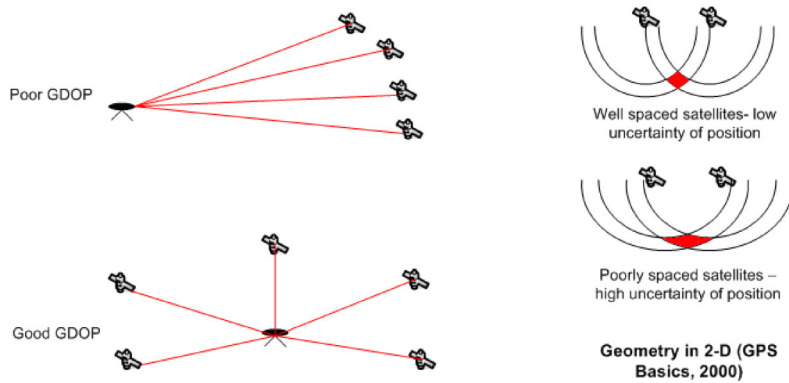


Figura 24: Exemplos de impacto de GDOP diferentes [29].

Através de Figura 24, num exemplo de localização através de satélites, é possível observar como uma dispersão dos satélites boa resulta numa zona de incerteza menor. Consequentemente o impacto do erro será menor na estimativa da posição. Dado que os sistemas de GPS possuem inúmeros satélites ao redor da terra, este conceito poderá ser útil para determinar um coeficiente de confiança ou até ajudar a escolher a melhor constelação de satélites que possam determinar uma posição com possibilidade de menor erro. Da mesma forma que afeta o GPS, o DOP também tem impacto com o SLI baseado na tecnologia UWB. É possível ainda, avaliar de forma individual, os diferentes impactos existentes com a disposição das âncoras como a diluição horizontal, vertical e posicional (3D) ($HDOP$, $VDOP$ e $PDOP$).

Uma colocação das âncoras bem planeada poderá reduzir os erros nos cálculos de posições. Quando a necessidade é estimar posições em duas dimensões (2D) ou em três dimensões (3D), é importante possuir uma dispersão das âncoras nos eixos respetivos. Idealmente, a disposição das âncoras não deve formar um plano em 3D. Por exemplo, usando apenas 4 âncoras numa instalação e dispondo-as de forma que ocupem os cantos da sala, as âncoras numa das diagonais poderiam estar colocadas no chão quanto que as restantes fixadas no teto. Neste formato, garantimos que as âncoras não estão a formar um plano 3D e obtemos uma boa dispersão.

Os fabricantes ou empresas que desenvolvem produtos que utilizam tecnologia UWB para localização, salientam a importância de se "respeitar" as recomendações e alguns fornecem juntamente com os seus equipamentos e/ou soluções ferramentas de análise de colocação das âncoras, nomeadamente a *POZYX* [16] e a *Sewio* [30].

Nem sempre é possível cumprir com estas diretrizes, como é o caso do laboratório de Robótica Avançada e Fábricas Inteligentes, uma vez que possui uma limitação na altura para fixação das âncoras. É previsível que o sistema possua maior erro no cálculo da posição relativa à altura (eixo Z). Desta forma, os valores que podemos obter de altura, comparativamente com os restantes eixos (X e Y), serão teoricamente alvo de um erro maior. A adicionar aos fatores anteriores, existem outros possíveis impactos no desempenho da solução, *i.e.* reflexões provenientes do chão ou teto e também a possibilidade de em algumas zonas existirem bloqueios de linha de vista a algumas âncoras (NLOS). A escolha de colocar todas as âncoras à mesma altura serve para tentar garantir que as mesmas se encontram em posições de LOS na maior parte da sala.

Para a fixação das âncoras foram utilizadas pequenas peças de madeira coladas a um íman numa extremidade e com uma tira de velcro na outra extremidade. Os ímãs servem para fixação ao teto metálico e a tira de velcro para fixar os dispositivos. A forma de fixação dos dispositivos usando o velcro, garante que estes ficam fixos de forma vertical e "invertida" para garantir que a antena esteja afastada das superfícies metálicas (teto) na distância recomendada (aproximadamente 20cm).



Figura 25: Exemplo de fixação da âncora no teto metálico. Na Figura do lado esquerdo, o retângulo azul representa o local onde a âncora está instalada.

Para alimentar os dispositivos âncoras utilizaram-se cabos de alimentação, através de um transformador adequado, ou pilhas de 3.7 Volt - RCR123 (recarregáveis), dependendo do acesso a tomadas elétricas na sala. Para a disposição das âncoras, decidiu-se instalar 8 ao redor da sala, fixadas no teto em zonas laterais. Após a fixação de 8 âncoras na sala, retiraram-se as coordenadas (x, y, z) das mesmas, com a utilização do teodolito. A colocação do teodolito foi efetuada de forma que fosse possível obter linha de vista a todas as âncoras para facilitar a obtenção das medições. Desta forma, obtemos cobertura total à sala e possível utilização do sistema para localizar a "tag" no interior - Figura 26. Numa fase inicial dos testes a sala não possuía placas de *pvc* espalhadas e penduradas, algo que foi posteriormente adicionado como a Figura 22 apresenta.

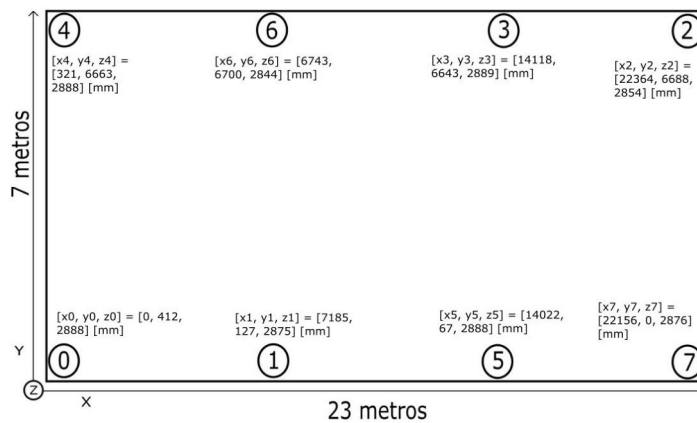


Figura 26: Representação da sala em 2D e disposição das âncoras numeradas e com as respectivas coordenadas.

A tabela 5 apresenta as coordenadas de cada âncora no laboratório.

Tabela 5: Coordenadas das âncoras.

| Âncora | X [mm] | Y [mm] | Z [mm] |
|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 0 | 412 | 2888 |
| 1 | 7185 | 127 | 2875 |
| 2 | 22364 | 6688 | 2854 |
| 3 | 14118 | 6643 | 2889 |
| 4 | 321 | 6663 | 2888 |
| 5 | 14022 | 67 | 2888 |
| 6 | 6743 | 6700 | 2844 |
| 7 | 22156 | 0 | 2876 |

3.3.2 Cálculo da posição

Para a definição do valor de posição foi adotada a letra p para facilidade de representação. Nas estimativas da posição (p) serão usadas as coordenadas 3D e portanto o valor será representado no formato $p = [p_x, p_y, p_z]$, que agrupa as coordenadas nos respetivos eixos X, Y e Z. Em futuras referências à posição será então usada esta notação.

Para efetuar a estimativa são utilizadas as distâncias obtidas pela *tag* a cada âncora e também as coordenadas das âncoras, apresentadas na Tabela 5. Com a utilização das distâncias obtidas, é possível utilizar a trilateração para estimar as posições.

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = d_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = d_2^2 \\ \dots \\ (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 + (z - z_n)^2 = d_n^2 \end{cases} \quad (23)$$

Com o sistema implementado é possível obter até 8 distâncias, conseqüentemente é possível determinar a posição usando diferentes combinações, desde o mínimo recomendado pelo fabricante de 4 distâncias até 8 distâncias para determinar a posição(p). Para estimar posições em 3D, foi inicialmente utilizado o método dos mínimos quadrados (*Least Squares* - LS). Resolvendo a equação 23 e sendo n o número de âncoras a utilizar, é possível obter as matrizes:

$$A = \begin{bmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 & z_1 - z_2 \\ x_1 - x_3 & y_1 - y_3 & z_1 - z_3 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_1 - x_n & y_1 - y_n & z_1 - z_n \end{bmatrix}, \quad b = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 + d_2^2 - d_1^2 \\ x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 + d_3^2 - d_1^2 \\ \dots \\ x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_n^2 - y_n^2 - z_n^2 + d_n^2 - d_1^2 \end{bmatrix}, \quad p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Finalmente, aplicar:

$$p = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (24)$$

Ao aplicar este método, deparou-se que os valores obtidos do eixo z (altura), possuem um erro muito elevado, comparativamente com os erros dos eixos x e y, efeito que tinha sido previsto: com um conjunto de distâncias obtidas pelo método SS-TWR: $[d_0, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7] = [12881, 6667, 10366, 3998, 13196, 3472, 7242, 9914]$ mm com

a posição real de: $p_{real} = [12861, 2983, 1658]$ mm.

Utilizando o LS para determinar a posição utilizando as 8 âncoras foi obtido o resultado: $p_{ls} = [12784, 3029, 16928]$ mm.

O valor da coordenada z da posição possui um erro muito elevado, tendo um valor absoluto muito superior à altura da sala. O facto de as âncoras estarem todas a mesma altura e a “natureza” do LS, resulta neste valor do erro muito elevado. Enquanto que os valores de X e Y possuem valores de erro baixos.

Optou-se por implementar uma variação do método LS para tentar obter melhorias em relação à posição estimada. O método dos mínimos quadrados iterativo (*Iterative Least Squares* - ITLS), que ao contrário do LS, utiliza os resíduos das distâncias de forma iterativa para melhorar a solução final. É possível utilizar uma coordenada de partida para determinar a solução, reduzindo o tempo de iteração e um valor de tolerância para avaliar os valores de resíduos das distâncias a cada iteração. Descrevemos agora o ITLS utilizado:

Algoritmo 1 Método dos mínimos quadrados iterativo - (ITLS)

Requer: $Anchor_{coords}, d, pInit$
Iniciando: $tol=1e^{-8}, maxIter=100, i=0, dxPos=0, p=0$
while $i < maxIter$ **do**
 $coords_{diff} \leftarrow Anchor_{coords} - pInit$ ▷ Diferença entre coordenadas e ponto inicial
 $tag_{dist} \leftarrow |coords_{diff}|$ ▷ Distâncias do ponto inicial às âncoras
 $G \leftarrow \begin{bmatrix} -coords_{diff} \\ tag_{dist} \end{bmatrix}$ ▷ Matriz de relação entre $coords_{diff}$ e tag_{dist}
 $diff_{range} \leftarrow d - tag_{dist}$ ▷ Resíduos das distâncias
 $dxPos \leftarrow lstsq(G, diff_{range})$ ▷ Usar o *least-square* para obter valor de correção
 $p \leftarrow p + dxPos$ ▷ Posição corrigida
 $pInit \leftarrow p$
 $i++$
 if $abs(dxPos) < tol$ **then**
 break
 end if
end while

Este método requer como parâmetro de entrada as coordenadas das âncoras ($Anchor_{coords}$), as distâncias medidas (d) e definição de uma posição inicial (ponto de partida - $pInit$). Em relação ao ponto de partida, este tem influência principalmente no número de iterações, quanto mais perto da solução menos iterações serão precisas. Como apresentado anteriormente, este método tem em conta a diferença dos resíduos das distâncias para melhorar a solução. A posição final (p) é atingida assim que o valor de tolerância (tol) ou o número máximo de iterações ($maxIter$) for atingido e a cada iteração o valor de posição é corrigida por $dxPos$.

Efetuada novamente a análise para o mesmo conjunto de medições de distâncias anteriormente referenciado e as coordenadas das âncoras, mas utilizando o método ITLS obtemos a posição $p_{itls} = [12809,3043,1578]$ mm.

Com a utilização deste método, é notória uma melhoria na estimativa da posição (nota: o valor da tolerância (tol) foi de 1^{-8} e o número máximo de iterações 100).

Relativamente ao LS a utilização do ITLS permite obter valores de posição com menor erro no eixo Z, adequando-se ao cenário que se pretende testar, *i.e.* localização 3D. Para os casos de localização em 2D, ambos os algoritmos têm desempenhos idênticos, pois os valores nos eixos de X e Y possuem um erro baixo.

TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo, são descritos os testes elaborados seguidos interpretação dos resultados obtidos. Inicialmente foi elaborado um simulador para determinar os coeficientes de DOP e avaliar geometricamente o local de teste e a instalação das âncoras. De seguida são elaborados testes para avaliar os erros relativos às distâncias obtidas e às posições estimadas em modo estático e dinâmico.

4.1 REALIZAÇÃO DOS TESTES

Numa primeira fase, elaborou-se uma simulação simples para avaliar a diluição de precisão relativa à implementação do SLI na sala em estudo (descrita na secção 3.3.1). Nesta simulação, utilizando as coordenadas das âncoras definidas anteriormente, pretendemos obter uma representação da variação da diluição de precisão nas possíveis localizações da *tag* na sala. Nesta simulação não se considerou possíveis perturbações relativas a comunicação UWB e considerou-se a sala vazia, *i.e.* desprezou-se as possíveis "barreiras" existentes na sala. Para efeitos de simulação, foi considerado que a *tag* se desloca sempre à mesma altura, *i.e.* esta apenas se desloca nas coordenadas X e Y da sala. Adicionalmente para a simulação, considerou-se sempre a utilização das 8 âncoras para determinar os valores de DOP.

De seguida, foram elaborados testes para avaliar a capacidade do SLI implementado no Laboratório de Robótica Avançada e Fábricas Inteligentes. Os testes visam avaliar os resultados das medições das distâncias e o conseqüente erro das posições estimadas em modo estático e dinâmico. Foi avaliada a robustez do método de estimação da posição ITLS usando inicialmente as 8 âncoras para as estimativas iniciais, removendo as iterativamente as âncoras que possuem um erro maior nas distâncias estimadas. Para obter as posições reais foi utilizado o teodelito e enquanto que as distâncias reais, determinou-se de forma matemática, utilizando as respetivas coordenadas das âncoras e o ponto real medido. É importante referir que no momento em se efetuaram os testes estáticos, a sala ainda não tinha instaladas placas de *pvc* espalhadas pela mesma, mas nos testes dinâmicos, estas já se encontravam instaladas.

Os testes executados podem ser resumidos na seguinte lista:

1. Análises das distâncias
 - a) Teste rotação da âncora
 - b) Teste de comparação de âncora LOS com NLOS
2. Teste Estático - Teste 1 - âncoras em LOS.
 - a) Estimativa utilizando todas as âncoras
 - b) Estimativa removendo âncoras com maior erro
3. Teste Estático - Teste 2 - âncora 5 em NLOS.
 - a) Estimativa com todas as âncoras
 - b) Estimativa removendo âncoras com maior erro
 - c) Estimativa removendo âncoras com maior erro e âncora 5 em NLOS
4. Teste Estático - Teste 3 - NLOS.
 - a) Estimativa com todas as âncoras
 - b) Estimativa removendo âncoras com maior erro
5. Teste dinâmico
 - a) Teste velocidade 1
 - b) Teste velocidade 2

Através desta lista apresentada e para uma melhor compreensão, foi adotada a notação de quando necessário referir algum dos testes mencionados indicamos o número e a respetiva letra para identificar, exemplificando, para referência ao Teste dinâmico de velocidade 1, a nomenclatura será 5a.

Análises das distâncias (rotação(1a) e NLOS(1b)): estes testes dividem-se em dois tipos, testes de análise do erro quando os dispositivos são sujeitos a rotação e testes de análise do erro quando os dispositivos se encontram NLOS, para a realização de ambos os testes colocou-se a *tag* e uma âncora (âncora 0) em duas distâncias distintas e efetuaram-se 2000 medidas. No primeiro teste (1a) a distância entre dispositivos é de 5013 mm, neste teste pretendemos analisar o comportamento do erro quando a comunicação UWB se dá em diferentes orientações. As orientações da âncora variam entre 0 a 270 graus, adicionalmente foi testado a configuração com orientação opostas entre a *tag* e a âncora. O segundo teste(1b), realizado a uma distância de 9110 mm, pretende-se avaliar o impacto do NLOS relativamente a uma comunicação LOS. Para "bloquear" a linha de vista foi utilizada uma placa

de *pvc* com uma espessura de 4 mm. Neste teste não foi considerada a distância a que a placa da *tag* e à âncora em teste. A Figura 27 ilustra os testes previamente descritos.

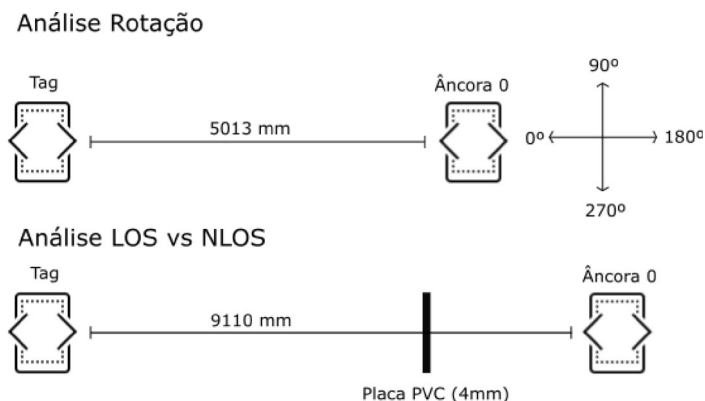


Figura 27: Análise da distância reportada pela *tag* quando sujeita à rotação e com um obstáculo de *pvc* na linha de vista.

Em ambos os casos a âncora foi fixa a um suporte capaz de efetuar as rotações e também manter uma posição estática. A Figura 28 apresenta ambos os cenários de teste.

Para os **testes de posição estática**, foram definidas duas posições para recolher medições e posteriormente proceder à avaliação do erro nas distâncias e posição estimada. Para a primeira posição, são efetuados dois testes diferentes, no primeiro teste é colocada a *tag* em situação de LOS com todas as âncoras (2a e 2b). Para o segundo teste (3a, 3b e 3c), pretendemos perturbar a comunicação da âncora 5, bloqueando a LOS entre esta e a *tag*. O bloqueio da LOS foi efetuado com uma placa metálica que possui contraplacado num dos lados. A Figura 29 demonstra a posição para o primeiro e segundo testes. O terceiro e último teste estático (4a e 4b), será efetuado numa posição diferente (segunda posição), onde existe uma probabilidade maior das comunicações serem efetuadas em NLOS. A Figura 30, retrata o cenário esperado para este teste. Em todos os testes estáticos são efetuadas 5000 conjuntos de medições de distâncias pela *tag* e analisados então os dados estatísticos tanto para as distâncias como para as posições estimadas. Para obter as medições efetuadas e as guardar para análise posterior foi utilizado um computador interligado à *tag*.

Finalmente os **testes dinâmicos (5a e 5b)**, foram executados com o auxílio de um tapete transportador linear, atuando este como o meio de translação da *tag*. É pretendido obter medições de distâncias com a *tag* com o tapete a efetuar

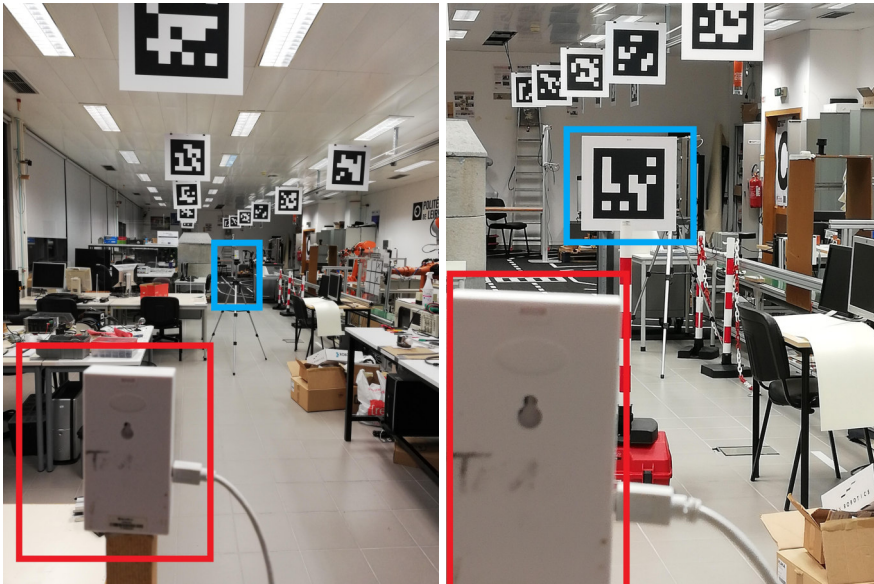


Figura 28: Testes das distâncias para avaliar o impacto nas rotações e na colocação de um objeto de *pvc* na linha de vista. Retângulo vermelho identifica o dispositivo *tag* e o retângulo azul identifica a âncora em utilização para os testes das distâncias da rotação e também a indicação da placa *pvc* utilizada para bloquear a linha de vista.

o deslocamento da mesma, utilizando duas possíveis velocidades de translação. O tapete é movido através de um motor *DC* de 12 *Volt* instrumentado com um *encoder* para obter contagem dos pulsos durante o movimento da *tag*.

É importante voltar a referir que nesta altura a sala sofreu alterações significativas no seu *layout*, sendo adicionadas ao longo da mesma, placas de *pvc* na zona central da sala, fixas ao teto falso, sendo uma destas utilizada para o teste nas distâncias anteriormente referenciado. Para este teste, existe uma maior probabilidade de obstáculos bloquearem a *LOS* da *tag* a algumas das âncoras ao longo do deslocamento no tapete. Para obter o deslocamento total, foram registados os pontos iniciais e finais dos deslocamentos e, juntamente com os pulsos obtidos é possível obter o *ground-truth* - Figura 31.

Nos testes dinâmicos, para facilitar o movimento da *tag* no tapete e para obter e guardar as medições das distâncias obtidas, foi necessário substituir o computador por um *Raspberry Pi* interligado com a *tag*. Para adquirir os pulsos do *encoder* foi utilizado um *Arduino Uno* interligado com um computador através da porta *série*¹.

¹ Para mais informação da interligação do *encoder* presente no anexo A.

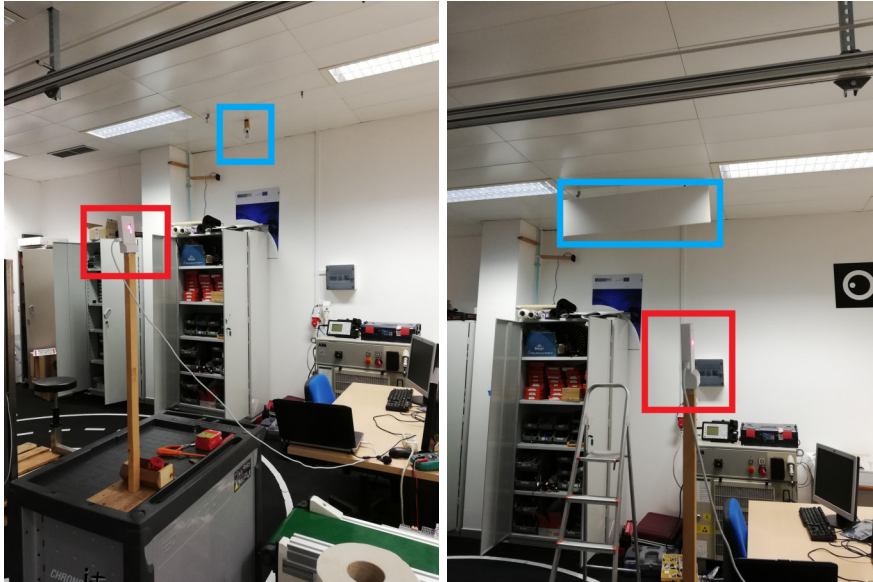


Figura 29: Posição da *tag* no teste 1 e teste 2. O retângulo vermelho representa a posição da *tag* e o retângulo azul representa a âncora 5 no caso de LOS e depois o bloqueio efetuado à mesma para o teste 2.

A Figura 32 apresenta um diagrama resumido da disposição dos vários testes e coordenadas correspondentes aos vários elementos para os testes de posição estática e dinâmica.

As notações que serão utilizadas são: d para referir distâncias e p para referir posição. Da mesma forma, para as análises estatísticas, serão determinados o erro médio, o desvio padrão do erro, o erro quadrático médio e também os valores de máximo e mínimo do erro. O formato de análise ao erro será sempre tendo em conta os valores reais com as unidades em milímetros: $erro = real - medido$.

4.2 ESTUDO DA DILUIÇÃO DE PRECISÃO

Foram realizadas 3 simulações com alturas distintas, 1 metro, 2 metros e 0.01 metros. Para este estudo os valores de $HDOP$, $VDOP$ e também o $PDOP$ são analisados, tendo em conta os valores da média, desvio padrão, máximos e mínimos dos coeficientes. Para análise visual também são apresentados mapas de cor por forma a avaliar de uma forma mais prática os coeficientes de diluição de precisão para múltiplos os casos.

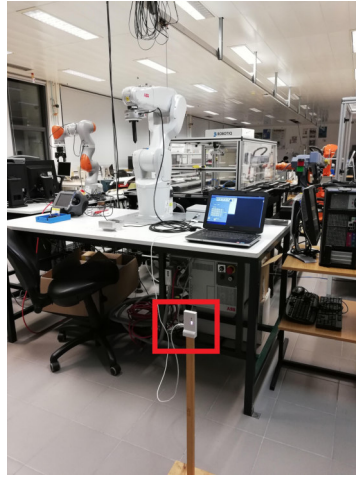


Figura 30: Posição da *tag* no teste 3, existe maior probabilidade de comunicações em NLOS. Retângulo a vermelho indica a posição da *tag*.



Figura 31: Cenário e tapete transportador linear no qual o teste dinâmico foi efetuado. As comunicações UWB para este cenário sofreram de diversos impactos devido aos vários obstáculos existentes.

Analisando a Figura 33, Figura 34 e a Figura 35, é possível verificar que, para o caso de localização 2D (*HDOP*), a colocação das âncoras, mesmo estando todas praticamente à mesma altura, não possui grande impacto em termos de valores de coeficientes para as 3 alturas da *tag*. Considerando a localização da *tag* na zona interior delimitada pelas 8 âncoras, a dispersão existente nas coordenadas (*X* e *Y*) das âncoras, beneficia na diluição de precisão horizontal, consequentemente o impacto do erro nas medições das distâncias não será elevado na estimativa da posição em 2D. Para o caso do *VDOP*, este já possui variação, notando-se que quanto mais baixo a *tag* se situar, melhores serão os valores de *VDOP* - Figura 34. Consequentemente, o *PDOP*, que é uma resultante da agregação do *HDOP* e *VDOP*, representa os coeficientes para o caso de 3D (*XYZ*). Desta forma, é notório

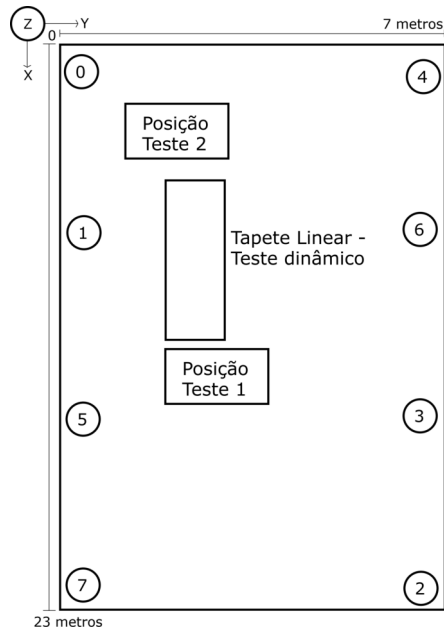


Figura 32: Representação em 2D da sala onde estão localizadas as âncoras, a ordem das mesmas e as posições da *tag* dos testes realizados. As coordenadas de cada âncoras estão representadas na Tabela 5 em que cada círculo representa a posição da respectiva âncora.

que a variação deste depende dos restantes, como o ambos mapas de diluição da precisão o demonstram. Tanto o *VDOP* como o *PDOP* possuem valores mais altos devido a todas as âncoras possuírem coordenadas de *Z* praticamente iguais.

Na Tabela 6 é possível comparar os resultados dos dados estatísticos de cada simulação, que retratam desta forma, as variações anteriormente referenciadas.

De uma forma geral os valores obtidos demonstram que o erro na estimativa da posição é provável ser maior no eixo da altura (*Z*) do que em relação ao eixo horizontal (*XY*). Para a localização 2D, a disposição das âncoras para as várias alturas da *tag*, não resulta num grande impacto.

Esta simulação serve para demonstrar a forma de como a colocação das âncoras pode resultar na redução do coeficiente de diluição de precisão e consequentemente reduzir o impacto relativo à geometria do sistema. Importa referir que a sala não se encontra vazia, e portanto estes dados de *DOP* poderão não refletir o real impacto nos resultados obtidos.

Efetuando o cálculo dos coeficientes de *DOP* para as duas posições de teste estáticos pretendidas obtemos a Tabela 7.

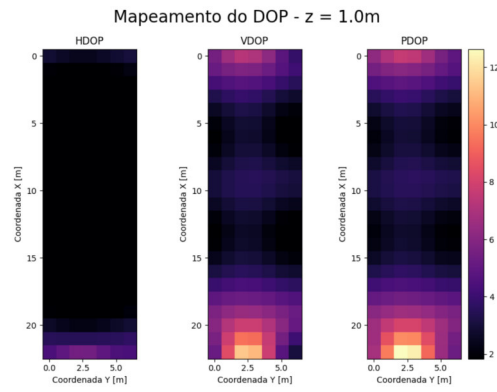


Figura 33: Representação dos valores de $HDOP$, o $VDOP$ e $PDOP$ nas coordenadas X(eixo vertical - comprimento da sala) e Y(eixo horizontal - largura da sala) com a *tag* à altura de 1 metro do chão.

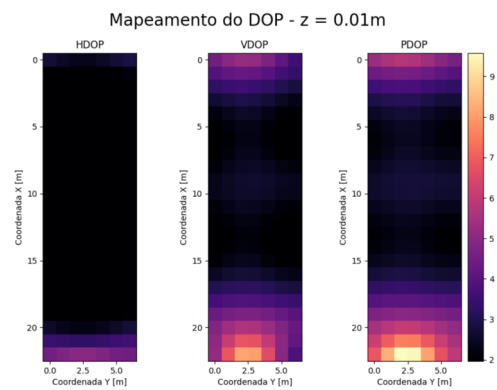


Figura 34: Representação dos valores de $HDOP$, o $VDOP$ e $PDOP$ nas coordenadas X(eixo vertical - comprimento da sala) e Y(eixo horizontal - largura da sala) com a *tag* à altura de 0.01 metros do chão.

Analisando os vários coeficientes de DOP simulados, concluí-se que para o cenário simulado o impacto na estimativa da posição no eixo XY (2D) será menor.

4.3 ANÁLISE DAS DISTÂNCIAS

Nesta secção serão analisados os resultados do teste das distâncias. Como descrito anteriormente, pretendemos colocar a *tag* a comunicar com a âncora 0, variando as condições de comunicação para avaliar o impacto nas mesmas. Neste primeiro teste, pretendemos observar o comportamento do erro para o caso de rotação da âncora. Com os resultados obtidos, foi elaborada a Figura 36 juntamente com a Tabela 8,

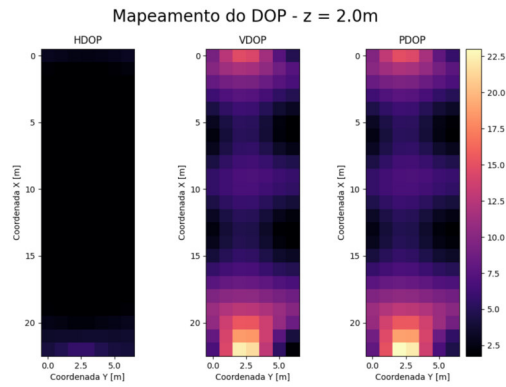


Figura 35: Representação dos valores de $HDOP$, o $VDOP$ e $PDOP$ nas coordenadas X(eixo vertical - comprimento da sala) e Y(eixo horizontal - largura da sala) com a *tag* à altura de 2 metros do chão.

onde se compara o erro resultante. Para a comparação foi utilizada como referência a comunicação frente a frente (faces dos dispositivos voltadas uma para a outra - 0 graus).

É notório que existem diferenças no erro entre as várias rotações da âncoras 0. Em todas o erro tornou-se negativo quando os dispositivos não se encontram frente a frente.

O impacto no erro quando colocado um objeto a provocar uma situação de NLOS a uma distância foi de 9110 milímetros, pode ser observado na Figura 37 e na Tabela 9. Foram recolhidas 2000 medições efetuadas tanto na situação de LOS como na situação de NLOS.

Para este caso, o impacto de colocar um obstáculo que não possui grande espessura (placa de *pvc*) nem materiais constituídos por metal, causou em média um aumento do erro de aproximadamente 20 milímetros.

Nesta secção procedeu-se aos ensaios alguns dos tipos de impactos que podem existir no local onde o SLI vai ser implementado. Para o caso da orientação das comunicações entre âncora e *tag*, este é um impacto difícil de prever/definir visto que diferentes causas podem estar associadas, desde o diagrama da radiação da antena até a forma de como estas se encontram fixadas. Este impacto varia conforme a posição a que se encontra e possivelmente com a distância da *tag* relativamente à localização das âncoras. Também os impactos das comunicações em NLOS que podem surgir de forma variada com a deslocação da *tag* pela sala, são difíceis de definir/prever devido aos diferentes materiais/objetos existentes na sala. Quando colocada a placa de *pvc* entre os dispositivos, o erro foi de 20 milímetros.

Tabela 6: Tabela de comparação dos valores de diluição de precisão para diferentes alturas da *tag* ao longo da sala de teste. Foram determinadas as médias (\bar{x}), desvio padrão (σ), máximos(*max*) e mínimos(*min*) dos coeficientes.

| Altura <i>Tag</i> | HDOP | VDOP | PDOP |
|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| 0.01 m | $\bar{x} = 1.54$ | $\bar{x} = 3.09$ | $\bar{x} = 3.48$ |
| | $\sigma = 0.92$ | $\sigma = 1.34$ | $\sigma = 1.34$ |
| | <i>max</i> = 4.99 | <i>max</i> = 8.18 | <i>max</i> = 9.58 |
| | <i>min</i> = 0.9 | <i>min</i> = 1.54 | <i>min</i> = 1.97 |
| 1 m | $\bar{x} = 1.52$ | $\bar{x} = 3.86$ | $\bar{x} = 4.19$ |
| | $\sigma = 0.98$ | $\sigma = 1.89$ | $\sigma = 2.06$ |
| | <i>max</i> = 5.46 | <i>max</i> = 11.38 | <i>max</i> = 12.63 |
| | <i>min</i> = 0.83 | <i>min</i> = 1.39 | <i>min</i> = 1.83 |
| 2 m | $\bar{x} = 1.50$ | $\bar{x} = 7.01$ | $\bar{x} = 7.22$ |
| | $\sigma = 1.00$ | $\sigma = 3.84$ | $\sigma = 3.88$ |
| | <i>max</i> = 5.72 | <i>max</i> = 23.30 | <i>max</i> = 23.03 |
| | <i>min</i> = 0.79 | <i>min</i> = 1.31 | <i>min</i> = 1.76 |

Tabela 7: Tabela de análise aos valores de diluição de precisão para a posição 1 (*LOS*) e posição 2 de testes estáticos. Para o cálculo foram utilizadas as 8 âncoras.

| Posição [X,Y,Z] | Âncoras Utilizadas | HDOP | VDOP | PDOP |
|-------------------|--------------------|------|------|------|
| [12861,2983,1658] | [0 1 2 3 4 5 6 7] | 0.81 | 3.94 | 4.02 |
| [2091,989,727] | [0 1 2 3 4 5 6 7] | 1.86 | 4.63 | 4.99 |

4.4 ANÁLISE AOS TESTES ESTÁTICOS

Nesta secção pretendemos analisar os resultados do testes elaborados com a *tag* numa posição estática.

4.4.1 Teste 1 - Âncoras em LOS

Para o primeiro teste estático(2a), com as âncoras em LOS, a posição real para é de $p_{real} = [12861, 2983, 1658]$ mm, que por sua vez determina que as distâncias reais a cada âncora sejam de $[d_0, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7] = [13173, 6469, 10269, 4060, 13126, 3371, 7256, 9837]$ mm.

Analisando estatisticamente o erro das distâncias, foi elaborada a Tabela 10, *i.e.* com as distâncias medidas na *tag*, determinou-se a média do erro, o desvio padrão do erro e o erro quadrático médio. Na Figura 38 e 39 apresenta-se a análise ao erro das distâncias medidas em relação aos valores reais.

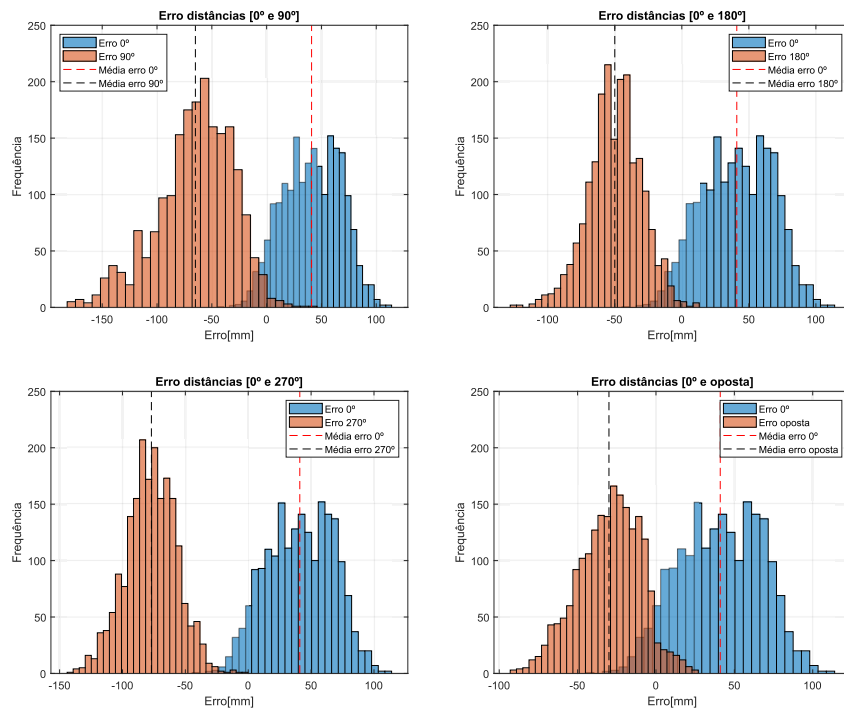


Figura 36: Histogramas de análise ao erro de 2000 medidas de distâncias com as várias rotações da âncora 0 em relação à *tag*.

Numa primeira análise é possível verificar que o erro *rms* e o desvio padrão nas distâncias para a âncora 0 e 1 possuem um valor maior comparativamente às restantes. Consultando os histogramas da Figura 38 é possível observar a distribuição do erro, onde as distâncias de 2 a 7 possuem uma distribuição aparentemente normal. Apesar de todas as comunicações serem teoricamente efetuadas em LOS, as âncoras 0 e 1 têm uma distribuição com três lobos. Este fenómeno resulta em valores de erro elevados, o que indica que poderá levar a um maior erro quando estas âncoras são utilizadas para estimar posições. Não foi possível determinar qual a razão deste efeito na distribuição das distâncias às âncoras 0 e 1, no entanto, é possível de verificar que se encontram objetos metálicos ao redor de ambas as LOS das âncoras.

Em relação ao cálculo da posição, foi utilizado inicialmente a combinação de 8 âncoras para determinar as posições. Com a posição real obtida com o teodelito, foi efetuada a comparação do erro nas estimativas obtidas com o algoritmo ITLS, determinando a média e o desvio padrão do erro e o erro quadrático médio.

Analisando a Figura 40, conclui-se que o erro nas coordenadas X e Y são mais baixos que na coordenada Z, algo que era previsível segundo a análise ao DOP.

Tabela 8: Resultados estatísticos do teste de rotação da âncora 0 em relação à *tag* onde, $\overline{erro_d}$ representa a média do erro, σ_{erro_d} o desvio padrão do erro, $RMSE_d$ o erro quadrático médio e por fim, $erro_{d_{max}}$ e $erro_{d_{min}}$, que representam os valores máximos e mínimos do erro. Para estes resultados foram analisados 2000 medições de distâncias em cada cenário.

| | 0° | 90° | 180° | 270° | Opostas |
|--------------------------|-----|------|------|------|---------|
| $\overline{erro_d}$ [mm] | 41 | -65 | -51 | -77 | -30 |
| σ_{erro_d} [mm] | 26 | 35 | 20 | 20 | 20 |
| $RMSE_d$ [mm] | 49 | 74 | 54 | 80 | 36 |
| $erro_{d_{max}}$ [mm] | 112 | 44 | 13 | 0 | 27 |
| $erro_{d_{min}}$ [mm] | -42 | -182 | -126 | -141 | -92 |

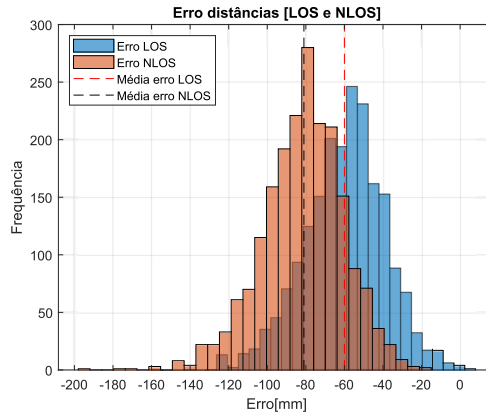


Figura 37: Histograma comparativo do erro entre uma comunicação em LOS e uma comunicação em NLOS numa distância de 9110 mm, com base em 2000 medições de distâncias.

Mesmo com a utilização das âncoras 0 e 1 com valores de erro nas distâncias algo elevados comparativamente com as restantes o erro não teve um impacto na mesma grandeza de valores. É importante referir que, como se utilizou para o cálculo da posição todas as medidas das distâncias às 8 âncoras, o erro individual é "diluído" no cálculo da posição. Sendo assim e tendo em conta o comportamento do erro das medidas das âncoras 0 e 1, bem como as restantes âncoras podem contribuir positiva ou negativamente nas estimativas da posição. Verifica-se um padrão quando analisada a Figura 41 no eixo X, existindo agrupamentos de pontos ao longo do eixo X. Através da Figura 40 verifica-se que o eixo que sofre maior impacto no erro é o Z, enquanto que nos restantes o erro é menor.

Tabela 9: Resultados do teste de LOS vs NLOS à distância de 9110 mm entre âncora 0 e a *tag*, onde $\overline{erro_d}$ representa a média do erro, σ_{erro_d} o desvio padrão do erro e $RMSE_d$ o erro quadrático médio e por fim, $erro_{d_{max}}$ e $erro_{d_{min}}$, que representam os valores máximos e mínimos do erro.

| | LOS | NLOS |
|--------------------------|------|------|
| $\overline{erro_d}$ [mm] | -60 | -81 |
| σ_{erro_d} [mm] | 21 | 21 |
| $RMSE_d$ [mm] | 61 | 84 |
| $erro_{d_{max}}$ [mm] | 6 | -16 |
| $erro_{d_{min}}$ [mm] | -156 | -196 |

Tabela 10: Análise às distâncias medidas para o teste 1 (*LOS*) a cada âncora. O $\overline{erro_d}$ representa o erro médio, σ_{erro_d} o desvio padrão do erro e ($RMSE_d$) o erro quadrático médio e por fim, $erro_{d_{max}}$ e $erro_{d_{min}}$, que representam os valores máximos e mínimos do erro.. Foram analisadas 5000 medições de distâncias obtidas durante aproximadamente 5 minutos.

| Âncora | $\overline{erro_d}$ [mm] | σ_{erro_d} [mm] | $RMSE_d$ [mm] | $erro_{d_{max}}$ [mm] | $erro_{d_{min}}$ [mm] |
|--------|--------------------------|------------------------|---------------|-----------------------|-----------------------|
| 0 | -28 | 267 | 220 | 432 | -652 |
| 1 | -155 | 259 | 261 | 287 | -710 |
| 2 | -103 | 24 | 103 | -30 | -199 |
| 3 | 81 | 17 | 81 | 142 | 27 |
| 4 | -82 | 16 | 82 | -34 | -138 |
| 5 | -80 | 25 | 80 | -4 | -170 |
| 6 | 16 | 18 | 19 | 76 | -51 |
| 7 | -59 | 16 | 59 | -6 | -116 |

Procedeu-se à remoção das âncoras 0 e 1 para o cálculo das estimativas da posição (2b) e foram elaboradas as Figuras 42 e 43 para analisar o impacto no erro. A análise estatística encontra-se na Tabela 12.

Com a remoção das âncoras 0 e 1, o erro das estimativas da posição reduziu comparativamente com o caso anterior, como se pode verificar pela Tabela 12. O padrão que se tinha detetado no eixo X da Figura 40 já não está presente. Como se pode verificar na Figura 43, o erro neste caso apresenta uma dispersão de pontos mais próximos e com um formato de nuvem. O que comprova que as medições das âncoras 0 e 1 contribuíam para um aumento do erro (*rmse*) mas não na mesma grandeza (250 mm), pois o erro estava a ser "*diluído*" através do cálculo do ITLS.

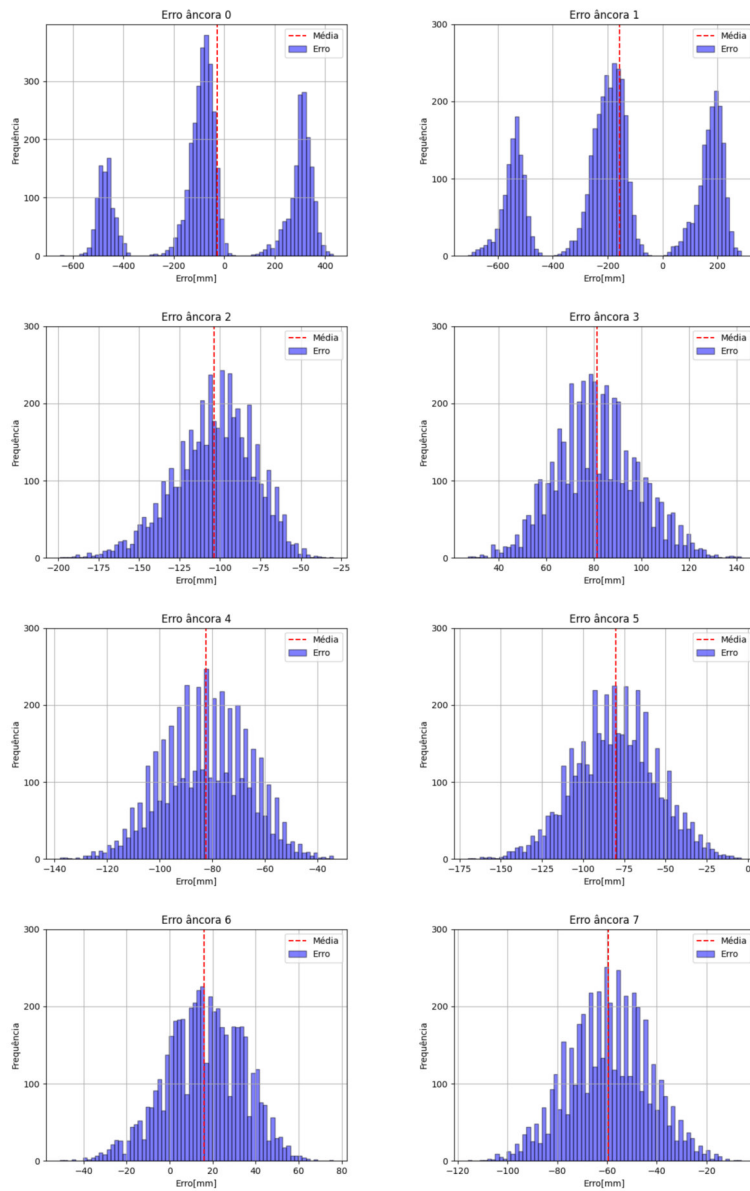


Figura 38: Histogramas de análise ao erro das distâncias e da média do erro para as várias âncoras no teste 1 estático.

4.4.2 Teste 2 - Âncora 5 em NLOS

Após a análise da secção anterior e mantendo a mesmas condições (posição da *tag*), efetuou-se a alteração à âncora 5 (3a) colocando-a em NLOS e realizaram-se

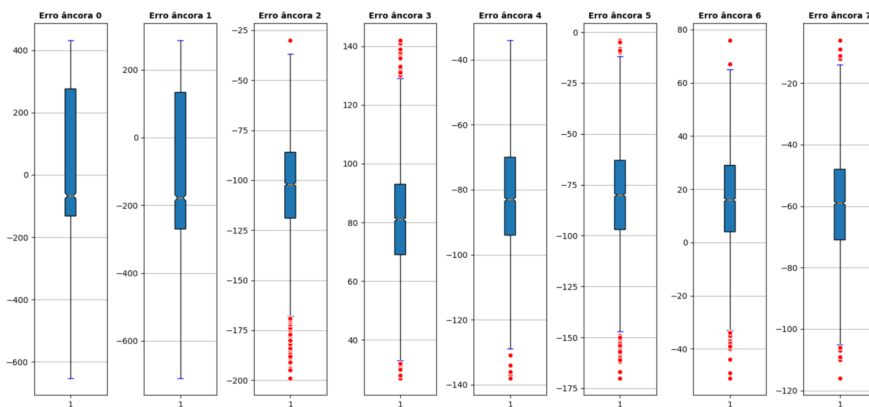


Figura 39: Comparação do erro das várias distâncias medidas no teste 1 estático.

Tabela 11: Resultados estatísticos do teste 1 usando todas as 8 âncoras. Nos dados representados, \bar{p} representa os valores médios da coordenadas(posição), \overline{erro}_p a média do erro, σ_{erro_p} desvio padrão do erro, $RMSE_p$ o erro quadrático médio e os valores max e min representam os valores máximos e mínimos respetivamente detetados nas várias coordenadas.

| | \bar{p} [mm] | \overline{erro}_p [mm] | σ_{erro_p} [mm] | $RMSE_p$ [mm] | max_{erro_p} [mm] | min_{erro_p} [mm] |
|---|----------------|--------------------------|------------------------|---------------|---------------------|---------------------|
| X | 12874 | -13 | 65 | 55 | 143 | -186 |
| Y | 3061 | -78 | 58 | 81 | 61 | -247 |
| Z | 1501 | 157 | 143 | 180 | 532 | -229 |

novamente novas medições de distâncias. Analisando as medições obtidas com a comunicação entre a *tag* e a âncora 5 em NLOS, pretende-se avaliar o impacto resultante tanto na distância como nas estimativas da posição pelo facto de uma das âncoras se encontrar em NLOS.

Em relação ao erro das distâncias e comparativamente com o caso anterior (Teste 1), quase todas as âncoras continuaram com o mesmo comportamento, como demonstra a Figura 44, excepto a âncora 5 que passou a ter um erro maior (média) comparativamente com o caso em LOS. O erro em média aumentou quase para o dobro e apresenta uma distribuição normal quando comparadas com as âncoras 0 e 1, que continuam com o mesmo comportamento detetado no caso anterior. Nas restantes âncoras, o erro manteve-se abaixo dos 100 mm, semelhante ao teste anterior.

Na Figura 46 e 47 encontram-se apresentados os resultados da posição, utilizando as 8 âncoras para efetuar as estimativas.

Erro Posição - Teste 1 3D - 8 âncoras

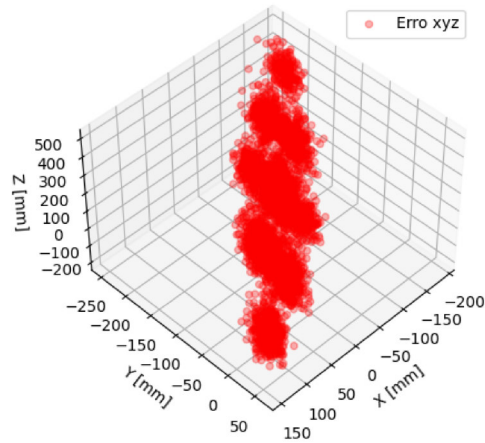


Figura 40: Erro das estimativas de posição efetuadas no teste 1 (*LOS*) utilizando a todas as âncoras (8).

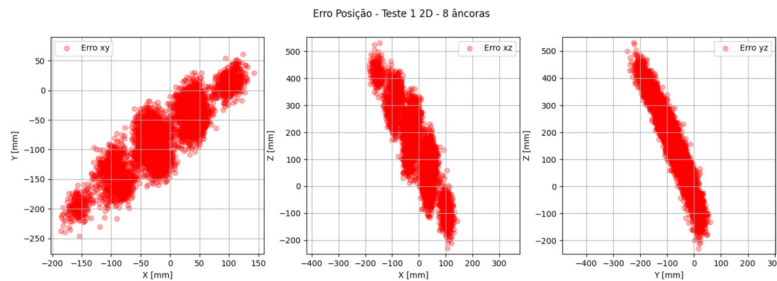


Figura 41: Projeção do erro da posição no teste 1 (*LOS*) pelos vários conjunto de eixos.

É possível observar que a dispersão dos pontos em X e Y manteve-se praticamente igual ao caso anterior, quando usadas 8 âncoras para determinar as posições. O mesmo padrão no eixo X do caso anterior está visível na Figura 47, o que indica que resulta novamente da variação do erro das âncoras 0 e 1. Analisando os dados estatísticos presentes na Figura 46, e comparando com os testes anteriores, o erro também teve um aumento, especialmente na coordenada Z , que continua a ser a coordenada com maior erro.

Tendo em conta os resultados anteriores(3a) procurou-se novamente analisar o erro, removendo as âncoras 0 e 1 e continuando com a âncora 5 em NLOS (3b). Pretendemos comparar este resultado com o anterior onde se removeu as âncoras 0 e 1 e a âncora 5 estava em LOS.

Erro Posição - Teste 1 3D - 6 âncoras

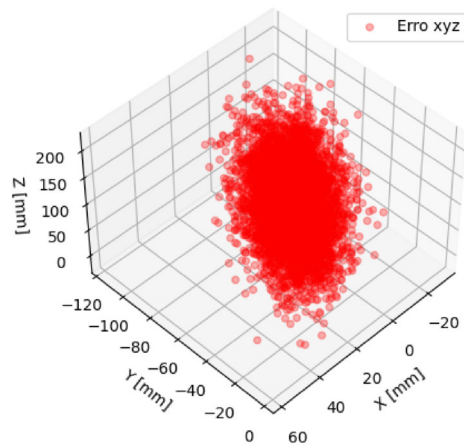


Figura 42: Erro das estimativas de posição no teste 1 (LOS) obtidas retirando as âncoras 0 e 1 para os cálculos.

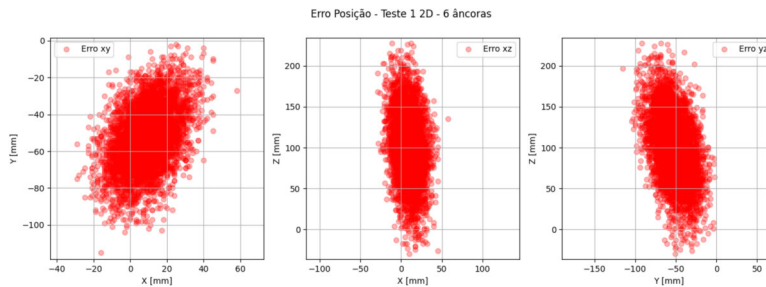


Figura 43: Projeção do erro da posição para o teste 1 (LOS) utilizando apenas as âncoras de 2 a 7 nas estimativas.

Os dados estatísticos presentes na Tabela 15 demonstram que o erro induzido pelo facto da âncora 5 estar em NLOS, não resulta num erro elevado nos eixos X e Y das coordenadas, excepto no eixo Z onde o erro é mais elevado que na situação anterior. Ao retirar as âncoras 0 e 1 do cálculo da posição resultou numa melhoria no eixo da coordenada Z, resultando assim numa menor variação dos valores de erro da posição, como se pode verificar na Figura 49.

Finalmente efetuamos a remoção da âncora 5 juntamente com as remoção já efetuada das âncoras 0 e 1 (3c) das estimativas da posição e desta forma resulta a Tabela 16.

Através da Tabela 16 é possível observar que a os valores de erro em média no eixo X e Y não obtiveram alteração significativa enquanto que no eixo Z o erro

Tabela 12: Resultados estatísticos do teste 1 usando apenas 6 âncoras [234567]. Nos dados representados, \bar{p} representa os valores médios obtidos nas coordenadas, $\overline{erro_p}$ a média do erro, σ_{erro_p} desvio padrão do erro, $RMSE_p$ o erro quadrático médio e max_{erro_p} e min_{erro_p} representam os valores máximos e mínimos respectivamente. Foram analisadas 5000 medições.

| | \bar{p} [mm] | $\overline{erro_p}$ [mm] | σ_{erro_p} [mm] | $RMSE_p$ [mm] | max_{erro_p} [mm] | min_{erro_p} [mm] |
|---|----------------|--------------------------|------------------------|---------------|---------------------|---------------------|
| X | 12852 | 9 | 11 | 12 | 58 | -29 |
| Y | 3036 | -53 | 16 | 53 | -2 | -115 |
| Z | 1556 | 102 | 40 | 102 | 228 | -30 |

Tabela 13: Análise às distâncias medidas no teste 2 com a âncora 5 em NLOS. O $\overline{erro_d}$ representa o erro médio, σ_{erro_d} o desvio padrão do erro e $RMSE_d$ o erro quadrático médio e por fim, $erro_{d_{max}}$ e $erro_{d_{min}}$, que representam os valores máximos e mínimos do erro. Foram analisadas 5000 medições de distâncias efetuadas com uma duração de 5 minutos.

| Âncora | $\overline{erro_d}$ [mm] | σ_{erro_d} [mm] | $RMSE_d$ [mm] | $erro_{d_{max}}$ [mm] | $erro_{d_{min}}$ [mm] |
|--------|--------------------------|------------------------|---------------|-----------------------|-----------------------|
| 0 | -31 | 297 | 255 | 412 | -784 |
| 1 | -197 | 303 | 307 | 315 | -840 |
| 2 | -111 | 25 | 111 | -42 | -199 |
| 3 | 3 | 18 | 15 | 68 | -57 |
| 4 | -88 | 16 | 88 | -32 | -139 |
| 5 | -149 | 17 | 149 | -92 | -210 |
| 6 | 8 | 17 | 15 | 68 | -52 |
| 7 | -72 | 16 | 72 | -26 | -127 |

médio aumentou aproximadamente 30 milímetros. O que comprova que os erros nas medições das distâncias têm maior impacto na coordenada Z (geometria das âncoras no local de teste) das estimativas da posição do que nas restantes coordenadas.

Tabela 14: Resultados estatísticos do teste 2 usando 8 âncoras e com a âncora 5 em NLOS. Nos dados representados, \bar{p} representa os valores médios, $\overline{erro_p}$ a média do erro, σ_{erro_p} desvio padrão do erro, $RMSE_p$ o erro quadrático médio e max_{erro_p} e min_{erro_p} representam os valores máximos e mínimos respectivamente.

| | \bar{p} [mm] | $\overline{erro_p}$ [mm] | σ_{erro_p} [mm] | $RMSE_p$ [mm] | max_{erro_p} [mm] | min_{erro_p} [mm] |
|---|----------------|--------------------------|------------------------|---------------|---------------------|---------------------|
| X | 12869 | -8 | 73 | 61 | 159 | -214 |
| Y | 3061 | -78 | 68 | 85 | 67 | -263 |
| Z | 1342 | 316 | 148 | 316 | 684 | -17 |

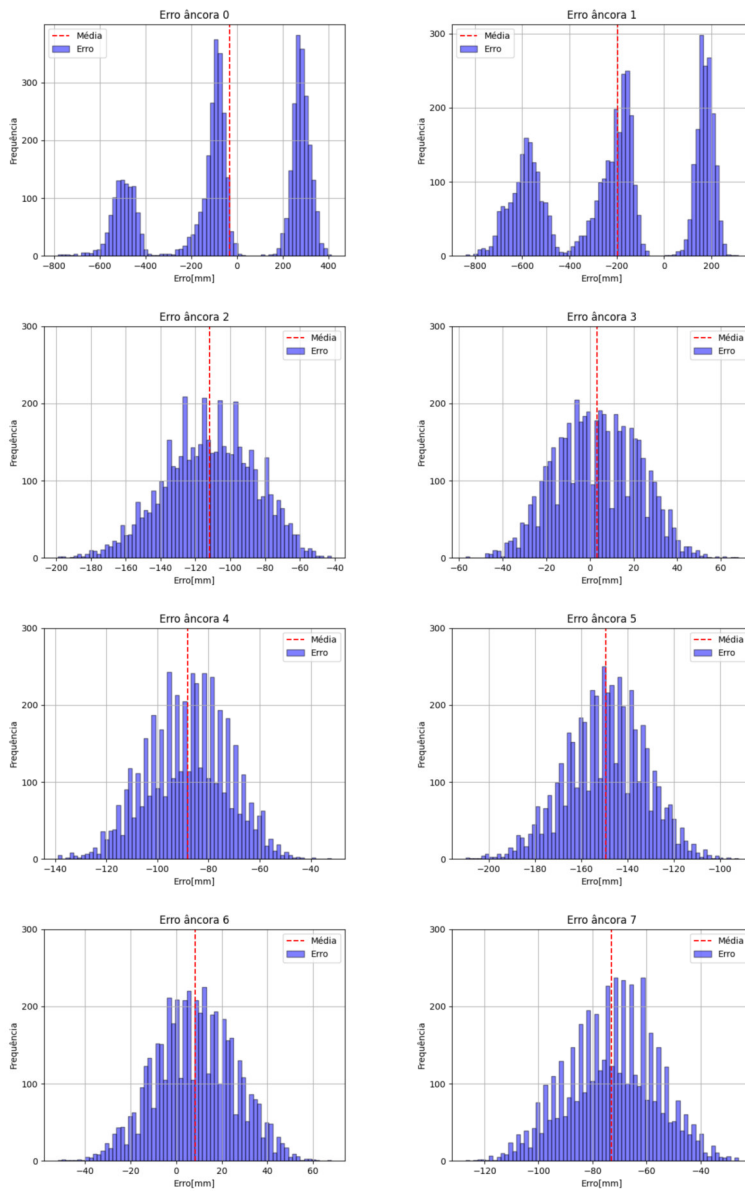


Figura 44: Histogramas de análise ao erro das distâncias obtidas às 8 âncoras no teste 2 mas com a âncora 5 em NLOS (teste 2 estático).

4.4.3 Teste 3 - NLOS

Para o teste 3 (NLOS - 4a), foi definida uma posição em que a maior parte das comunicações UWB entre a *tag* e as âncoras serão efetuadas em NLOS. A

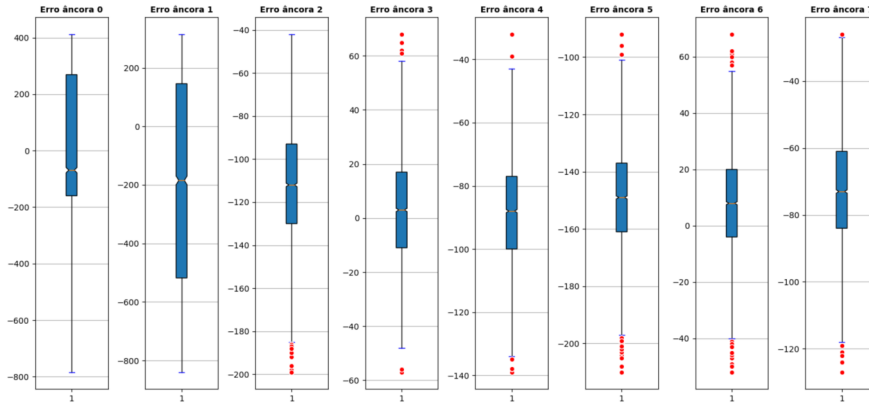


Figura 45: Comparação do erro das várias distâncias medidas para o teste 2 mas com a âncora 5 em NLOS.

Tabela 15: Resultados estatísticos do teste 2 usando apenas 6 âncoras [234567]. Nos dados representados, \bar{x} representa os valores médios, \overline{erro} a média do erro, σ_{erro} desvio padrão do erro, $RMSE_p$ o erro quadrático médio e max_{erro_p} e min_{erro_p} representam os valores máximos e mínimos respetivamente do erro.

| | \bar{p} [mm] | $\overline{erro_p}$ [mm] | σ_{erro_p} [mm] | $RMSE_p$ [mm] | max_{erro_p} [mm] | min_{erro_p} [mm] |
|---|----------------|--------------------------|------------------------|---------------|---------------------|---------------------|
| X | 12847 | 14 | 11 | 15 | 57 | -19 |
| Y | 3034 | -51 | 14 | 51 | 0 | -97 |
| Z | 1396 | 262 | 29 | 262 | 358 | 157 |

probabilidade de existir um incremento do erro tanto nas distâncias medidas bem como nas estimativas das posições é maior que no caso dos testes anteriores. Pretende-se novamente analisar tanto o erro das distâncias como o erro das estimativas da posição.

Através da posição real ($p_{real} = [2091, 989, 727]$ mm) são obtidas as distâncias reais de $[d_0, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7] = [3061, 5595, 21165, 13464, 6324, 12160, 7664, 20203]$ mm.

Neste teste (4a), é notório que existem mais medições de distâncias que possuem um erro elevado, quando comparando com o teste 1 e 2. Apenas as âncoras 0, 3 e 5

Tabela 16: Resultados estatísticos do teste 2 usando apenas 5 âncoras [23467]. Nos dados representados, \bar{x} representa os valores médios, \overline{erro} a média do erro, σ_{erro} desvio padrão do erro, $RMSE_p$ o erro quadrático médio e max_{erro_p} e min_{erro_p} representam os valores máximos e mínimos respetivamente do erro.

| | \bar{p} [mm] | $\overline{erro_p}$ [mm] | σ_{erro_p} [mm] | $RMSE_p$ [mm] | max_{erro_p} [mm] | min_{erro_p} [mm] |
|---|----------------|--------------------------|------------------------|---------------|---------------------|---------------------|
| X | 12849 | 12 | 13 | 14 | 60 | -27 |
| Y | 3047 | -64 | 34 | 65 | 48 | -182 |
| Z | 1365 | 293 | 74 | 293 | 524 | 3 |

Erro Posição Teste 2 3D - 8 âncoras

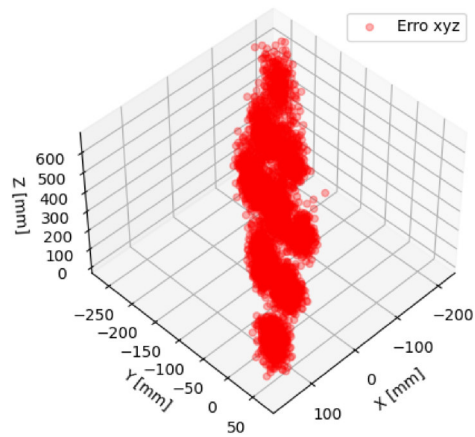


Figura 46: Erro das estimativas da posição no teste 2 utilizando 8 âncoras para o cálculo e com a âncora 5 em NLOS.

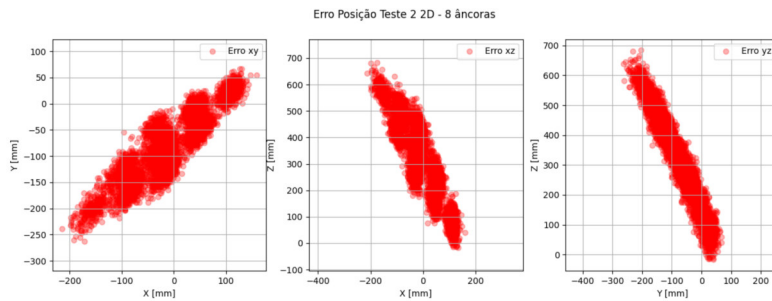


Figura 47: Projeção do erro da posição utilizando apenas as âncoras para o teste 2 e com a âncora 5 em NLOS. Estimativas utilizando 8 âncoras.

possuem valores de erro ($RMSE$) abaixo dos 100mm mesmo existindo valores de *outliers* - Figura 50 e 51. As restantes distâncias medidas possuem erros ($RMSE$) entre 110 mm e cerca de 500 mm - Tabela 17. É esperado que com estes valores de erro que o cálculo da posição, utilizando as 8 âncoras, sofra um maior impacto quando comparado com os testes anteriores.

Em relação ao erro da posição, este tem praticamente a mesma grandeza em média em todos os eixos. - Figura 52. Pela Figura 53 é possível também verificar que em relação à dispersão dos pontos, estes se concentram maioritariamente numa zona, existindo alguns *outliers*. No eixo Z é onde existe uma maior dispersão de estimativas de posição, algo que se tem observado em todas as análises feitas até agora.

Erro Posição Teste 2 3D - 6 âncoras

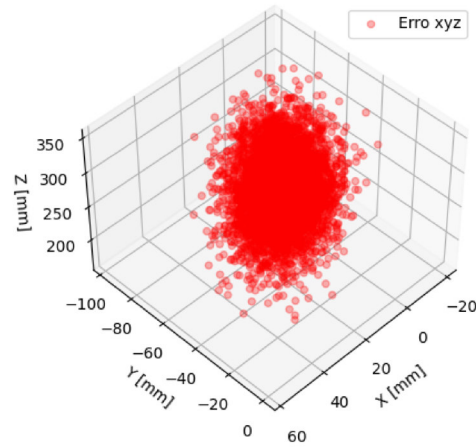


Figura 48: Erro das estimativas da posição no teste 2 utilizando apenas as âncoras de 2 a 7 para o cálculo.

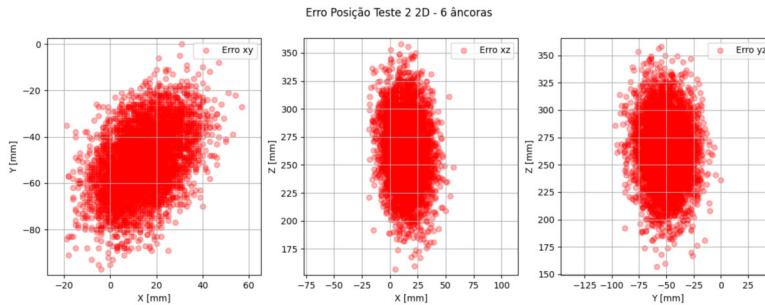


Figura 49: Projeção do erro da posição utilizando apenas as âncoras de 2 a 7 para o teste 2.

Foi efetuada a remoção das âncoras com maior erro nas distâncias (4b) e estimou-se novamente a posição. As âncoras removidas para este caso foram as que possuíam valores de erro superiores a 200 mm, resultando num conjunto de 5 âncoras (0,3,4,5 e 7) utilizadas pelo algoritmo de estimação da posição ITLS.

Com esta combinação de âncoras obteve-se um erro menor em média praticamente em todos os eixos, comparativamente com a utilização das 8 âncoras. A redução das grandezas nos vários eixos foi de aproximadamente entre 50 a 100 milímetros. Com a remoção das âncoras com maior erro significou para este caso uma melhoria na estimativa posição.

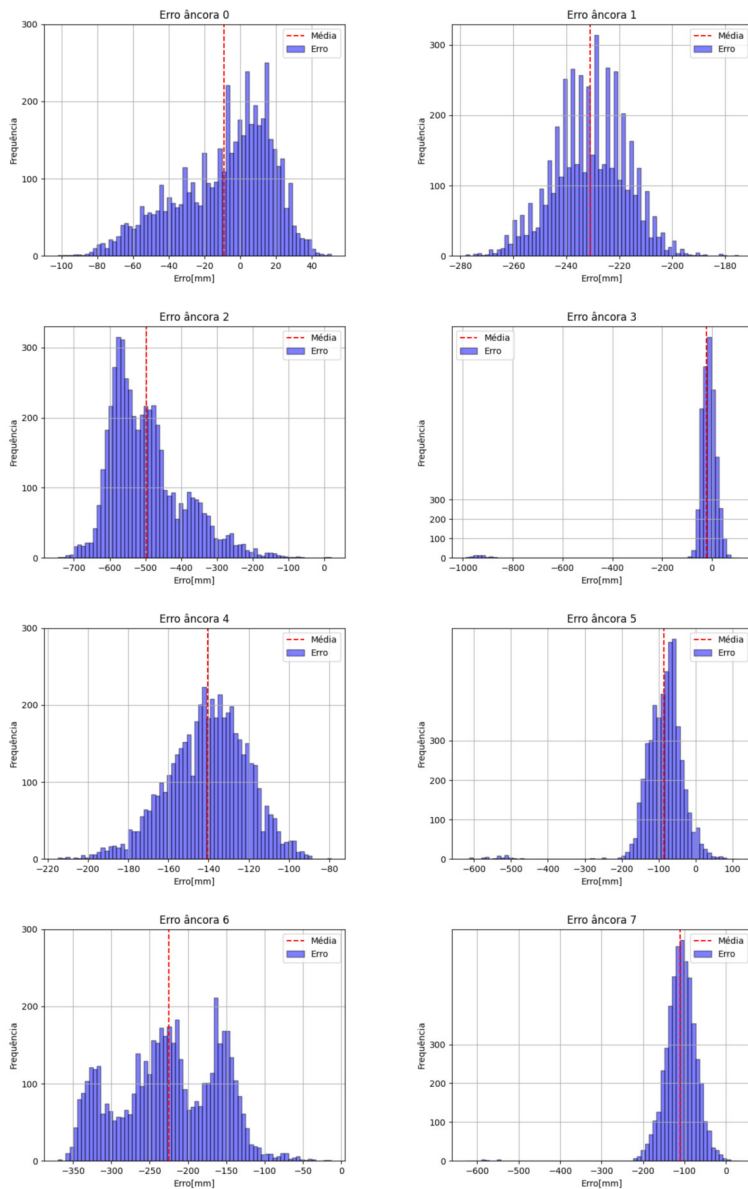


Figura 50: Histogramas de análise ao erro das distâncias obtidas às 8 âncoras para o teste 3 estático (situação de NLOS).

4.5 ANÁLISE AOS TESTES DINÂMICOS

Nesta secção são analisados os testes dinâmicos efetuados para avaliar o impacto na estimativa da posição em casos onde a *tag* se encontra em movimento. O tempo

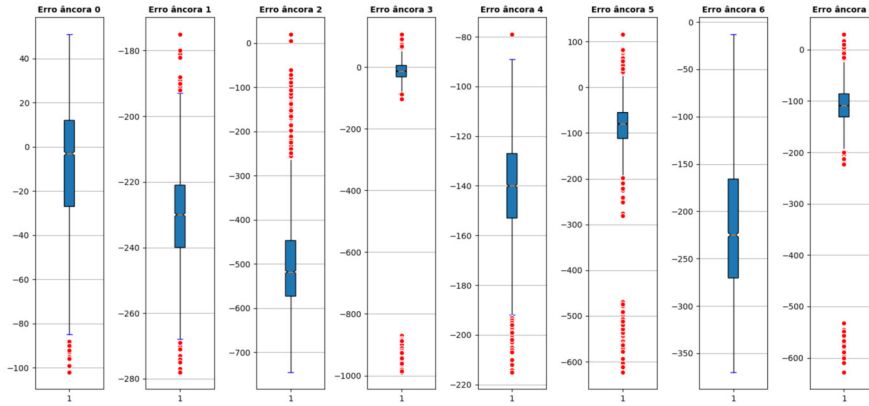


Figura 51: Comparação do erro das várias distâncias medidas para o teste 3.

Tabela 17: Análise do erro das distâncias medidas na posição do teste 3. O \overline{erro}_d representa o erro médio, σ_{erro_d} o desvio padrão do erro e $RMSE_d$ o erro quadrático médio e por fim, $erro_{d_{max}}$ e $erro_{d_{min}}$, que representam os valores máximos e mínimos do erro. Foram analisadas 5000 medições de distâncias efetuadas com uma duração de 5 minutos.

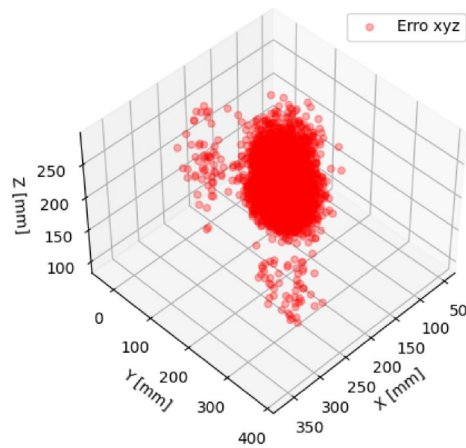
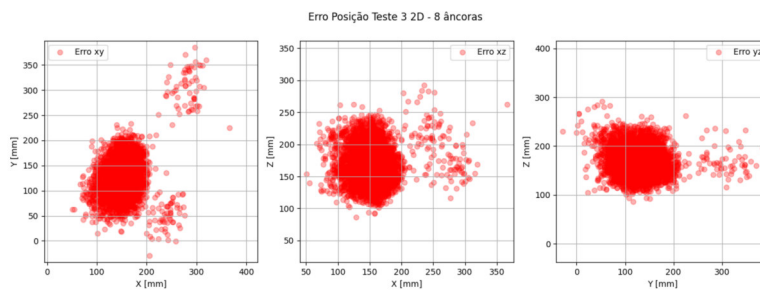
| Âncora | \overline{erro}_d [mm] | σ_{erro_d} [mm] | $RMSE_d$ [mm] | $erro_{d_{max}}$ [mm] | $erro_{d_{min}}$ [mm] |
|--------|--------------------------|------------------------|---------------|-----------------------|-----------------------|
| 0 | -8 | 26 | 21 | 51 | -102 |
| 1 | -230 | 13 | 230 | -175 | -278 |
| 2 | -497 | 103 | 497 | 20 | -745 |
| 3 | -23 | 104 | 35 | 106 | -989 |
| 4 | -140 | 19 | 140 | -76 | -215 |
| 5 | -85 | 60 | 86 | 116 | -623 |
| 6 | -224 | 65 | 224 | -13 | -370 |
| 7 | -110 | 43 | 110 | 30 | -628 |

de aquisição das 8 distâncias utilizado foi de aproximadamente de 0.04 segundos. Regulando a tensão do motor *DC* acoplado ao tapete, foi possível obter duas velocidades de teste. Foi adicionado o *encoder* para obter os tempos de ocorrência dos pulsos durante o deslocamento. Desta forma é possível reconstituir o deslocamento real.

Na primeira velocidade de teste, os pulsos foram obtidos com período de aproximadamente de 0.140 segundos enquanto que na segunda velocidade, a mais rápida, os pulsos ocorriam com um período de aproximadamente 0.054 segundos.

Para obter o deslocamento real no tapete, utilizou-se o número total de pulsos e a distância real efetuada pelo deslocamento da *tag*. Recorrendo ao teodelito é adquirida a posição inicial e a posição final de cada um dos testes dinâmicos, estas

Erro Posição Teste 3 3D - 8 âncoras

Figura 52: Erro da estimativas da posição no teste 3 *NLOS* utilizando 8 âncoras.Figura 53: Projeção do erro da posição nos vários eixos no teste 3 *NLOS* utilizando 8 âncoras.

são utilizadas para determinar o deslocamento efetuado e com os pulsos do *encoder* e assim é possível determinar os incrementos efetuados.

Como descrito anteriormente, o *Raspberry Pi* guarda os valores das distâncias calculadas pela *tag* enquanto que um computador captura os pulsos do *encoder* utilizado no tapete. Ambos os dispositivos de captura foram sincronizados de forma manual. Para a análise do erro foi necessário efetuar uma aproximação (regressão linear) nos tempos obtidos pelas distâncias capturadas em relação aos tempos de aquisição dos pulsos do *encoder* obtidos pelo computador. Desta forma, para obter uma aproximação e considerando a velocidade constante do deslocamento do tapete, foi necessário determinar um ponto aproximado aos pulsos do *encoder*, que se encontram imediatamente antes e depois. A Figura 56 demonstra um exemplo da necessidade de efetuar este processo para analisar o erro.

Tabela 18: Resultados estatísticos do teste 3 usando 8 âncoras. Nos dados representados, \bar{p} representa os valores médios da posição, $\overline{erro_p}$ a média do erro, σ_{erro_p} desvio padrão do erro, $RMSE_p$ o erro quadrático médio e os valores obtidos de max_{erro_p} e min_{erro_p} que representam os valores máximos e mínimos respectivamente do erro.

| | \bar{p} [mm] | $\overline{erro_p}$ [mm] | σ_{erro_p} [mm] | $RMSE_p$ [mm] | max_{erro_p} [mm] | min_{erro_p} [mm] |
|---|----------------|--------------------------|------------------------|---------------|---------------------|---------------------|
| X | 1938 | 153 | 28 | 153 | 366 | 51 |
| Y | 861 | 128 | 39 | 128 | 385 | -29 |
| Z | 560 | 167 | 28 | 167 | 292 | 86 |

Erro Posição Teste 3 3D - 5 âncoras

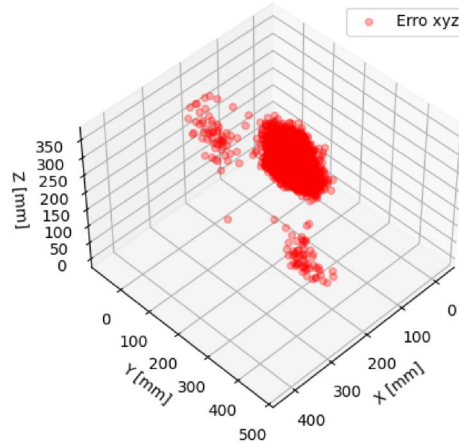


Figura 54: Erro da estimativas da posição no teste 3 utilizando as âncoras [03457].

Interpretando a Figura 56, retiramos que T_x é o tempo correspondente da ocorrência do pulso do *encoder* e T_0 e T_1 são os tempos de ocorrência de obtenção das distâncias pela *tag* imediatamente antes e depois respectivamente. Sabendo o tempo total entre a ocorrência das duas aquisições das distâncias é possível determinar um ponto intermédio de posição, tendo em conta o que representa o tempo obtido do pulso do *encoder*.

$$T_r = \frac{T_x}{T_1 - T_0} \quad (25)$$

O termo T_r é a relação que T_x representa em função dos tempos T_0 e T_1 . Com esta relação e utilizando os valores da posição estimados nos instantes T_0 e T_1 é possível determinar a distância que representa o T_r em função de cada eixo. Então, sabendo posição estimada no tempo T_0 e da posição no tempo T_1 , é possível determinar o deslocamento de cada coordenada (x_{dist} , y_{dist} e z_{dist}) e assim aplicar o coeficiente

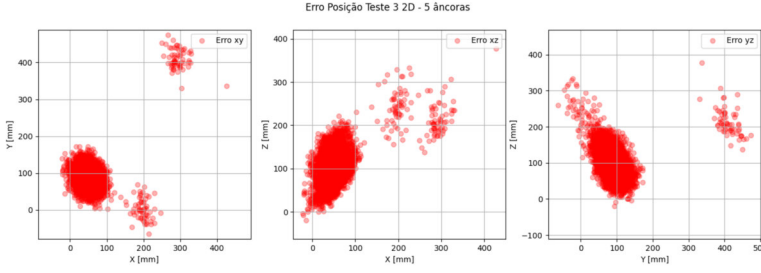


Figura 55: Projeção do erro da posição nos vários eixos no teste 3 utilizando as âncoras [03457].

Tabela 19: Resultados estatísticos do teste 3 usando 5 âncoras [03457]. Nos dados representados, \bar{p} representa os valores médios da posição, \bar{erro}_p a média do erro, σ_{erro_p} desvio padrão do erro, $RMSE_p$ o erro quadrático médio e os valores max_{erro_p} e min_{erro_p} representam os valores máximos e mínimos respectivamente do erro.

| | \bar{p} [mm] | \bar{erro}_p [mm] | σ_{erro_p} [mm] | $RMSE_p$ [mm] | max_{erro_p} [mm] | min_{erro_p} [mm] |
|---|----------------|---------------------|------------------------|---------------|---------------------|---------------------|
| X | 2038 | 53 | 37 | 53 | 427 | -22 |
| Y | 898 | 91 | 44 | 91 | 474 | -64 |
| Z | 626 | 101 | 41 | 101 | 377 | -19 |

de relação determinado anteriormente na equação 25 para determinar a posição $P_x = [x, y, z]_{T_r}$:

$$[x, y, z]_{T_r} = [x_{T_0} + (x_{dist} * T_r), y_{T_0} + (y_{dist} * T_r), z_{T_0} + (z_{dist} * T_r)] \quad (26)$$

Com o método anterior descrito (regressão linear) é possível comparar os valores da posição a cada pulso do *encoder* com um valor obtido por uma aproximação entre dois valores de estimativas de posição. É importante referir que apenas serão comparadas o número de estimativas de acordo com o número de pulsos obtidos durante os testes, o que resulta num número de aquisições que serão descartadas para as análises do erro. Efeitos associados à propagação como por exemplo, o efeito de *Doppler*, são desprezados.

4.5.1 Teste velocidade 1

Para o primeiro teste dinâmico(5a) foi usada velocidade baixa, a *tag* possui a seguinte posição inicial ($p_{init} = [6757, 2346, 884]$ mm) e posição final ($p_{end} = [12093, 2382, 890]$ mm). Foram contabilizados 881 pulsos do *encoder* durante o teste, que representa um deslocamento de 5336 mm com incrementos de 6 mm. A duração

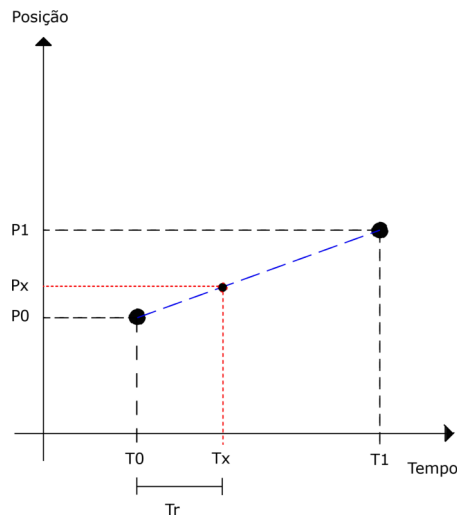


Figura 56: Representação da regressão linear implementada para determinar a posição da *tag*(Px) no momento do pulso do *encoder*(Tx).

total de tempo de deslocamento entre a posição inicial à final foi de 2 minutos e 16 segundos (136 segundos).

Analisando o primeiro teste dinâmico elaborou-se a Figura 57, utilizando as 8 âncoras para determinar a posição. Está representado também o deslocamento real tendo em conta os pulsos obtidos pelo *encoder*. Consultando a Figura 58, podemos analisar o comportamento do erro em função dos eixos.

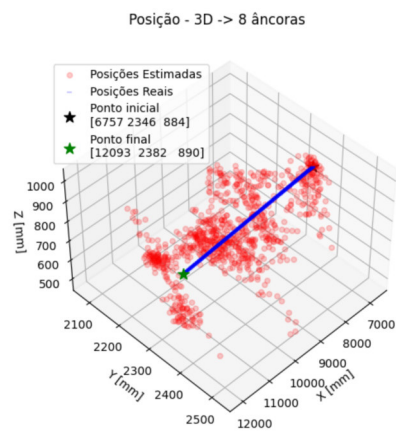


Figura 57: Posição em 3D do movimento real da *tag* e as estimativas obtidas, utilizando 8 âncoras para o teste de velocidade 1.

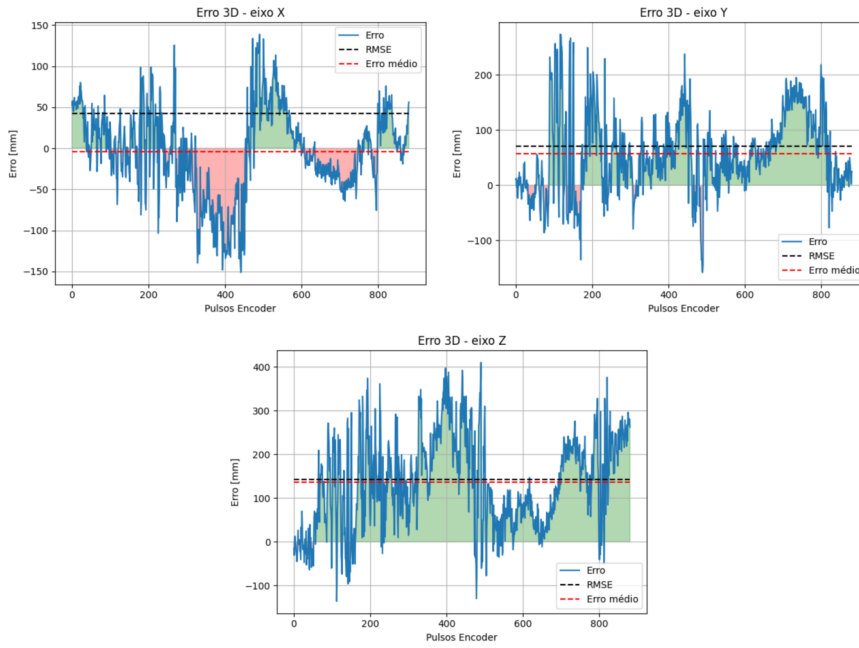


Figura 58: Erro em posição no teste de velocidade 1 obtido com as estimativa das distâncias de 8 âncoras.

Analisando agora o erro (RMSE), os eixos X e Y possuem um erro menor que 100 mm, enquanto que apenas o eixo Z possui um valor mais elevado. Em relação à variação do erro, esta possui comportamento idêntico ao dos testes estáticos. De notar também as variações que existem nos valores de erro para os vários eixos que podem dever-se à alternância de situações LOS para NLOS, e vice-versa, das várias âncoras.

Tabela 20: Resultados do erro em cada eixo do teste de velocidade 1 (lenta) utilizando 8 âncoras para calcular a posição, onde \overline{erro}_p representa a média do erro, σ_{erro_p} o desvio padrão e $RMSE_p$ o erro quadrático médio. Foram utilizadas 881 estimativas de posição que ocorreram durante cerca de 136 segundos.

| | \overline{erro}_p [mm] | σ_{erro_p} [mm] | $RMSE_p$ [mm] | $erro_{max}$ [mm] | $erro_{min}$ [mm] |
|---|--------------------------|------------------------|---------------|-------------------|-------------------|
| X | -4 | 53 | 42 | 138 | -151 |
| Y | 57 | 72 | 71 | 273 | -157 |
| Z | 136 | 107 | 143 | 410 | -135 |

4.5.2 Teste velocidade 2

Para o segundo teste dinâmico(5b), com a velocidade mais rápida em relação ao teste anterior, a posição inicial de $p_{init} = [6703, 2354, 888]$ mm e a posição final de $p_{end} = [12210, 2371, 894]$ mm, o deslocamento foi de 5507 mm durante aproximadamente 43 segundos. Em relação aos pulsos, foram obtidos 905 representando com incrementos de 6 mm - Figura 59.

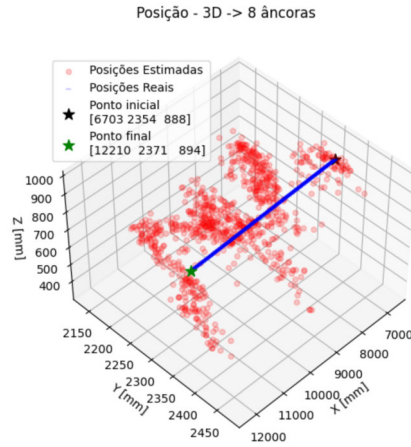


Figura 59: Posição 3D do movimento real da tag e as estimativas obtidas, utilizando 8 âncoras para o teste de velocidade 2.

Tabela 21: Erro em cada eixo obtido no teste de velocidade 2 (rápida) utilizando 8 âncoras para calcular a posição, onde \overline{erro}_p representa a média do erro, σ_{erro_p} o desvio padrão e $RMSE_p$ o erro quadrático médio. Foram analisadas 905 estimativas de posição que ocorreram durante 43 segundos.

| | \overline{erro}_p [mm] | σ_{erro_p} [mm] | $RMSE_p$ [mm] | $erro_{max}$ [mm] | $erro_{min}$ [mm] |
|---|--------------------------|------------------------|---------------|-------------------|-------------------|
| X | -80 | 53 | 83 | 68 | -237 |
| Y | 65 | 59 | 74 | 223 | -112 |
| Z | 141 | 106 | 145 | 553 | -90 |

Comparativamente com a teste anterior(5a) e observando a Figura 60, conclui-se que ambas a coordenadas X e Y tiveram uma pequeno aumento do erro com uma velocidade maior na deslocação da tag, enquanto que a coordenada Z praticamente manteve mesmo ordem de grandeza do erro. Adicionalmente é possível observar que, para a coordenada X, o erro é praticamente sempre negativo, nos restantes eixos o comportamento foi praticamente idêntico ao teste anterior. Da mesma forma,

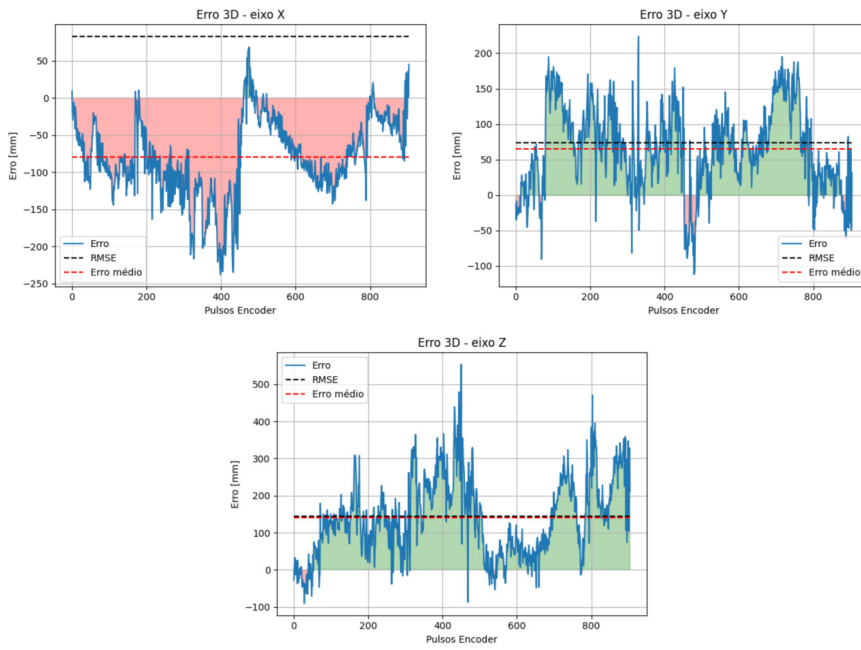


Figura 60: Erro obtido com as estimativas das distâncias obtidas com 8 âncoras nos vários eixos para o teste de velocidade 2.

também é possível observar através da Figura 60 a transição de estados LOS e NLOS das comunicações com as âncoras ao longo do deslocamento.

O principal foco deste projeto de mestrado consistiu em caracterizar e testar a tecnologia UWB para SLI. Utilizando as métricas apresentadas para caracterizar os SLI, o UWB possui uma capacidade de operar na gama das dezenas de metros (cobertura). O custo poderá depender de vários fatores, nomeadamente, custos de instalação, manutenção, variação do preço dos equipamentos, ou até a forma de como a tecnologia é utilizada (centralizada ou descentralizada), método de obtenção das distâncias, entre outros. Consultando alguns dos diversos estudos elaborados, é possível concluir que esta tecnologia permite operar com gamas de erro na ordem dos centímetros, o que a destaca comparativamente com outras soluções. Contudo, esta tecnologia também apresenta problemas em situações NLOS, onde o impacto no erro nas distâncias estimadas é maior e, conseqüentemente, a estimativa da posição é também afetada.

Na caracterização descrita neste documento são definidos/estudados pontos importantes para ser possível tirar melhor proveito desta tecnologia. Questões como a calibração dos dispositivos que operam com UWB, bem como o posicionamento das âncoras na infraestrutura do edifício, ou até o algoritmo utilizado para estimar distâncias e posições, são cruciais para obter melhores resultados. Com o estudo realizado reforçou-se a importância da calibração dos dispositivos para que se minimize o erro associados à obtenção das distâncias. Apesar dos *kits* de desenvolvimento da *DecaWave*, utilizados neste trabalho, possuem calibração de fábrica, foi necessário efetuar um reajuste por forma a obter resultados com erros na ordem de grandeza dos anunciados pelo fabricante. Uma calibração correta do *Antenna Delay* e do *Bias Correction* contribuíram para reduzir o erro das estimativas.

A disposição das âncoras é outro requisito importante de se cumprir. Não só pelo impacto da diluição de precisão (geometria formada pelas âncoras), mas também de modo a possuir uma boa visibilidade das mesmas (comunicações LOS). A colocação elaborada no nosso SLI não era a melhor em função da diluição de precisão, com as âncoras praticamente à mesma altura. Estudando a diluição de precisão no local de implementação dos testes, verificou-se que, para reduzir o impacto do erro nas estimativas da posição, era necessário que o dispositivo a ser localizado se

encontre dentro do perímetro das âncoras instaladas. Importa referir também que um maior número de âncoras instaladas aumenta a probabilidade de a *tag* possuir comunicações em LOS com as mesmas, o que consequentemente pode contribuir para as estimativas de posição não sofrerem tanto impacto das medições em NLOS.

A aplicação do algoritmo ITLS contribuiu para obter estimativas com menor erro de posição, comparativamente com o algoritmo LS. O erro existente na coordenada Z nas estimativas, quando utilizado o ITLS, foi razoavelmente menor. A forma como o algoritmo opera, utilizando os valores de resíduos das distâncias em cada iteração, ajuda na obtenção de uma solução mais aproximada do valor real. Desta forma, existe uma mitigação do erro devido às âncoras possuírem todas a mesma altura. Em contrapartida, este algoritmo necessita de um tempo superior de cálculo e depende de condições iniciais.

Os testes elaborados contribuíram para analisar o comportamento em diferentes situações e caracterizar a implementação efetuada. Foram elaborados testes em LOS e NLOS, em modo estático e também em modo dinâmico, para analisar o comportamento do erro, com o auxílio de equipamento de medição adequando para validação das medidas e estimativas efetuadas.

Os valores de erro obtidos nos testes estáticos variam entre 100 mm e 250 mm nos vários eixos de coordenadas, podendo em alguns casos, e principalmente em coordenadas 2D (eixos X e Y), obter valores de erro menor que os 100 mm. Nos casos em que existiam comunicações em NLOS, filtrando as distâncias resultantes, foi possível reduzir o erro nas estimativas da posição. O *firmware* desenvolvido para a *tag* comunica de forma sequencial a cada âncora o que poderá originar erros nas estimativas devido à deslocação, principalmente se a deslocação da *tag* for mais rápida que a aquisição do conjunto de 8 medições das distâncias. Contudo, nos testes dinâmicos elaborados, a aquisição era mais rápida para os dois casos testados e o erro obtido foi praticamente o mesmo comparando com os testes estáticos. É importante referir que também não foi utilizado qualquer filtro nos valores de estimativas das posições. Os valores obtidos confirmam algumas implementações testadas por outros autores, nomeadamente os mencionados na Secção 2.2.

De referir igualmente que os erros obtidos, mesmo quando apenas âncoras em LOS são utilizadas, podem dever-se ainda a outros fatores, tais como o local de teste ter maior ou menor reflexões de sinal, o número de âncoras/distâncias utilizadas para o cálculo da posição(algoritmo), bem como se estas estavam com ou sem visibilidade para a *tag*. Outro ponto que se verificou ser importante, é a possível limitação da tecnologia/dispositivos (MDEK1001 - Decawave). Estando

possivelmente a trabalhar no limite da tecnologia utilizada, os erros que resultam, mesmo em condições favoráveis de LOS, poderão não ser possíveis de melhorar. Todo o trabalho desenvolvido está presente no repositório criado que acompanha este trabalho e que poderá ser consultado na Web¹.

Para trabalho futuro propõe-se testar a implementação realizada noutros ambientes como, por exemplo, naves industriais. Seria importante avaliar a robustez e capacidade de adaptação da caracterização realizada noutros ambientes, testando com uma dispersão das âncoras adequada, especialmente em altura, e avaliar se os resultados obtidos se aproximam aos obtidos neste estudo. A adaptação do *firmware* para melhorar a utilização do protocolo de comunicação UWB (*SS-TWR*) com as âncoras, em particular para sistemas em movimento, poderá ser algo que leve à redução do impacto no erro da estimativa da posição em movimento. Por exemplo a utilização de âncora sincronizadas, leva a ser possível implementar outro protocolo de cálculo de distâncias (TDoA) e consequentemente a diminuição do número de mensagens para determinar as distâncias.

Outra possível implementação seria a integração desta tecnologia em *hardware* próprio, elaborando uma calibração adequada e integrando outros sensores nas *tag's* (por exemplo, IMU). A aplicação de filtros para determinar estimativas da posição, especialmente dinâmica com movimento efetuado pela *tag*, pode contribuir para uma melhoria na estimativa da posição.

Existem algumas aplicações possíveis de serem associadas ao estudo e utilização dos dados obtidos. Por exemplo, poder-se-ia efetuar estudos/análises baseados aprendizagem automática (*machine learning*) para determinar e/ou melhorar as estimativas no cálculo da posição, detetar padrões específicos, ou até implementar outros algoritmos para estimar a posição. A quantidade de dados que resultam dos testes elaborados é significativa. Como tal, será interessante utilizar ciência da área dos dados nomeadamente *big data*, de forma a retirar informação estatisticamente relevante, procurando possíveis padrões ou melhorias que contribuam para a redução do erro de posição, ou tornar o sistema mais robusto. A deteção de situações de NLOS seria um passo importante, pois permitiria mitigar o impacto das leituras nessa situação, procurando melhorar a solução final, ou até selecionar as melhores âncoras para obter as distâncias para uma estimativa mais correta.

¹ Repositório - https://github.com/ipleiria-robotics/indoor_positioning_uwb

BIBLIOGRAFIA

- [1] S. A. (Kekavat e R. M. Buehrer, *Handbook of Position Location, Theory, Practice, and Advances*. A John Wiley & Sons, INC., PUBLICATION, 2012.
- [2] M. Al-Ammar, S. Alhadhrami, A. Al-Salman et al., «Comparative Survey of Indoor Positioning Technologies, Techniques, and Algorithms», pp. 245–252, out. de 2014, 10.1109/CW.2014.41.
- [3] F. Khelifi, A. Bradai, A. Benslimane, P. Rawat e M. Atri, «A Survey of Localization Systems in Internet of Things», *Mobile Networks and Applications*, ago. de 2018. DOI: [10.1007/s11036-018-1090-3](https://doi.org/10.1007/s11036-018-1090-3).
- [4] N. B. M. Wilson Sakpere Michael Adeyeye-Oshin, *A state-of-the-art survey of indoor positioning and navigation systems and technologies*. South African Computer Journal 29(3), 2017, <https://doi.org/10.18489/sacj.v29i3>.
- [5] F. Zafari, A. Gkelias e K. Leung, *A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies*. South African Computer Journal 29(3), 2017, <https://doi.org/10.18489/sacj.v29i3>.
- [6] B. M. T. Lopes, *Algoritmos de localização com informação histórica e reatimentação dos utilizadores*. Universidade do Minho, 2014, <http://hdl.handle.net/1822/34193>.
- [7] Decawave. (), URL: <http://https://www.decawave.com/>.
- [8] U. Nazir, M. Arshad, N. Shahid e S. Raza, «Classification of Localization Algorithms for Wireless Sensor Network: A Survey», ago. de 2012. DOI: [10.1109/ICSSST.2012.6472830](https://doi.org/10.1109/ICSSST.2012.6472830).
- [9] R. N. Zahid Farid e M. Ismail, «Recent Advances in Wireless Indoor Localization Techniques and System», *Mobile Networks and Applications*, p. 12, mai. de 2013. DOI: [10.1155/2013/185138](https://doi.org/10.1155/2013/185138).
- [10] A. Yassin, Y. Nasser, M. Awad et al., «Recent Advances in Indoor Localization: A Survey on Theoretical Approaches and Applications», *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, n.º 2, pp. 1327–1346, 2017.

- [11] F. Shang, W. Su, Q. Wang, H. Gao e Q. Fu, «A Location Estimation Algorithm Based on RSSI Vector Similarity Degree», *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 10, n.º 8, p. 371-350, 2014. DOI: [10.1155/2014/371350](https://doi.org/10.1155/2014/371350). URL: <https://doi.org/10.1155/2014/371350>.
- [12] F. Mazhar, M. Khan e B. Sällberg, «Precise Indoor Positioning Using UWB: A Review of Methods, Algorithms and Implementations», *Wireless Personal Communications*, vol. 97, ago. de 2017. DOI: [10.1007/s11277-017-4734-x](https://doi.org/10.1007/s11277-017-4734-x).
- [13] B. Yang e E. Yang, «A Survey on Radio Frequency based Precise Localisation Technology for UAV in GPS-denied Environment», *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 103, jun. de 2021. DOI: [10.1007/s10846-021-01500-4](https://doi.org/10.1007/s10846-021-01500-4).
- [14] J. Yan, *Algorithms for Indoor Positioning Systems Using Ultra-Wideband Signals*. Delft University of Technology, 2010.
- [15] C. M. Almansa, *A Study on UWB-Aided Localization for Multi-UAV Systems in GNSS-Denied Environments*. University of Turku, Turku Intelligent Embedded e Robotic Systems (TIERS) Lab, 2020.
- [16] POZYX, *POZYX - Ultra-Accurate Indoor Positioning*. URL: <https://pozyx.io/>.
- [17] L. Zwirello, T. Schipper, M. Harter e T. Zwick, «UWB Localization System for Indoor Applications: Concept, Realization and Analysis», *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2012, mar. de 2012. DOI: [10.1155/2012/849638](https://doi.org/10.1155/2012/849638).
- [18] A. R. Jiménez e F. Seco, «Improving the Accuracy of Decawave's UWB MDEK1001 Location System by Gaining Access to Multiple Ranges», *Sensors*, vol. 21, n.º 5, 2021, ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s21051787](https://doi.org/10.3390/s21051787). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/5/1787>.
- [19] P. Cotera, M. Velazquez, D. Cruz, L. Medina e M. Bandala, «Indoor Robot Positioning Using an Enhanced Trilateration Algorithm», *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 13, n.º 3, p. 110, 2016. DOI: [10.5772/63246](https://doi.org/10.5772/63246). URL: <https://doi.org/10.5772/63246>.
- [20] B. Fang, «Simple solutions for hyperbolic and related position fixes», *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 26, n.º 5, pp. 748-753, 1990. DOI: [10.1109/7.102710](https://doi.org/10.1109/7.102710).
- [21] F. Bonnin-Pascual e A. Ortiz, «An UWB-based System for Localization inside Merchant Vessels», set. de 2019, pp. 1559-1562. DOI: [10.1109/ETFA.2019.8869511](https://doi.org/10.1109/ETFA.2019.8869511).

- [22] V. Barral, P. Suárez-Casal, C. J. Escudero e J. A. García-Naya, «Multi-Sensor Accurate Forklift Location and Tracking Simulation in Industrial Indoor Environments», *Electronics*, vol. 8, n.º 10, 2019, ISSN: 2079-9292. DOI: [10.3390/electronics8101152](https://doi.org/10.3390/electronics8101152). URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/10/1152>.
- [23] Decawave, *DW1000 User Manual - How to use, configure and program the DWM1000 Transceiver V2.18*. 2017.
- [24] S. Shah, K. Chaiwong, L.-o. Kovavisaruch, K. Kaemarungsi e T. Demeechai, «Antenna Delay Calibration of UWB Nodes», *IEEE Access*, vol. 9, pp. 63 294–63 305, abr. de 2021. DOI: [10.1109/ACCESS.2021.3075448](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3075448).
- [25] Decawave, *APS014 application note - antenna delay calibration of dw1000-based products and systems Version 1.2*. 2018.
- [26] G. Hu, P. Feldhaus, Y. Feng et al., «Accuracy Improvement of Indoor Real-Time Location Tracking Algorithm for Smart Supermarket Based on Ultra-Wideband», *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, vol. 33, n.º 12, p. 2058 004, 2019. DOI: [10.1142/S0218001420580045](https://doi.org/10.1142/S0218001420580045).
- [27] S. G. Zafer Sahinoglu e I. Güvenc, *Ultra-wideband Positioning Systems - Theoretical Limits, Ranging Algorithms, and Protocols*. Cambridge University Press, 2008.
- [28] T. M. L. de Sousa Silva, *Análise de Erros em Receptores de GNSS*. Engenharia Electrotécnica e de Computadores, 2007.
- [29] URL: <https://marinegyaan.com/what-is-gdop-or-geometric-dilution-of-precision/>.
- [30] Sewio, *Sewio Networks s.r.o. - Real-time location system (RTLS) for indoor tracking*. URL: <https://www.sewio.net/>.

ANEXOS

ANEXO A

Neste anexo descreve-se o conteúdo adicional ao documento e também o repositório do código que foi desenvolvido para disponibilizar o *software* e *firmware* desenvolvidos.

A.1 REPOSITÓRIO

A Figura 61 demonstra a estrutura de pastas do repositório criado, onde se encontram as aplicações de *software* desenvolvido.

A.2 FIRMWARE - MDEK1001 DECAWAVE

Para o *firmware* desenvolvido para os dispositivos MDEK1001 da Decawave, foram elaboradas duas versões, uma para ser integrada nas âncoras e outra para ser integrada na *tag*. Para o desenvolvimento deste código foi efetuado um *fork* ao repositório do fabricante¹ que exemplifica a instalação e integração no *Integrated Development Environment* (IDE) do projeto. Inicialmente foram seguidas as instruções do mesmo para colocar o projeto operacional. Depois, foram elaboradas as versões a serem utilizadas para este trabalho e por forma a facilitar a compreensão do mesmo, efetuou-se a criação de duas *branches*, uma com a versão para as âncoras e outra para a versão da *tag*.

- **dwm1001-anchor**: é utilizado pelas âncoras, onde é apenas necessário alterar o *ID* de identificação das mensagens transmitidas entre os dispositivos em UWB. Nas comunicações das âncoras, estas recebem primeiro uma mensagem de *broadcast* enviada pela *tag*, contendo as configurações associadas ao UWB a serem usadas para as medições das distâncias. No final das obtenção das distâncias uma nova mensagem em *broadcast* para terminar as comunicações UWB. Cada âncora irá responder individualmente a cada pedido efetuado pela *tag*.

¹ Repositório Decawave - <https://github.com/Decawave/dwm1001-examples>

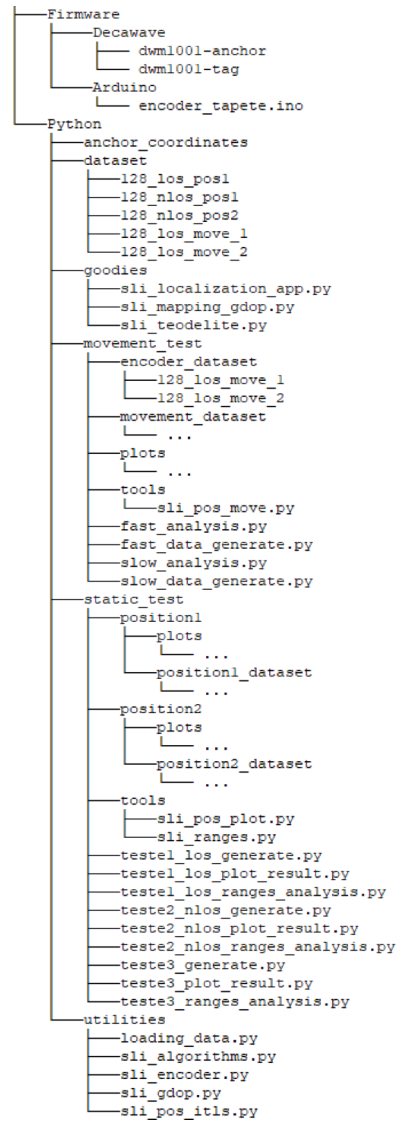


Figura 61: Estrutura de pastas e ficheiros importantes do repositório criado.

- **dwm1001-tag**: este é utilizado pela *tag* e possui diferenças em relação ao *firmware* das âncoras. Com este é possível configurar o formato das comunicações UWB nos dois modos selecionados (128 de preâmbulo e 6.81Mbps ou 1024 de preâmbulo e 110Kbps). Adicionalmente, opções como selecionar e ordenar as comunicações com as âncoras, consultar dados estatísticos das comunicações, obter o CIR de cada recepção de comunicação UWB, entre outros. No protocolo de comunicação para obtenção das distâncias, é enviada pela *tag* uma mensagem *broadcast* com a indicação do formato da comunicação UWB a ser utilizado e depois, de forma individual, é enviada uma mensagem a cada âncora para determinar o tempo de voo do sinal. Este processo ocorre um número definido de vezes que o utilizador pretender.

Para uma melhor compreensão do *software* utilizado e também das sequências utilizadas para elaborar os testes, é recomendado seguir as instruções adicionadas no repositório em causa que se encontra na secção de *firmware*.

A.3 FERRAMENTAS DE ANÁLISE - PYTHON 3

São descritas agora as ferramentas desenvolvidas para guardar e analisar os dados obtidos com a *tag*. Para a utilização do código elaborado em *Python 3*, apenas é necessário efetuar a instalação do mesmo e das bibliotecas adicionais. Todos estes passos estão indicados na descrição do repositório associado à parte do *software*. A Tabela 22 descreve os principais *scripts Python* utilizados.

Dentro da pasta *dataset* é onde estão presentes os dados recolhidos das distâncias nos vários testes elaborados. Na pasta *goodies* estão presentes os *scripts* utilizados no apoio ao estudo do DOP e da aplicação usada interligar com a *tag* para recolher e guardar os dados para futura análise. Os vários testes encontram-se separados pelas respetivas pastas (*static_test* e *movement_test*) com os respetivos resultados. Mais informações de como interpretar os ficheiros utilizados remetemos o autor para o repositório que acompanha este projeto.

A.4 TESTES DINÂMICOS - INSTALAÇÃO ENCODER - TAPETE TRANSPORTADOR LINEAR

Para os testes dinâmicos foi necessário implementar um *encoder* acoplado ao tapete linear para obter o deslocamento real da *tag*. A Figura 62 demonstra como o

Tabela 22: Tabela com as descrições dos principais *script's* em linguagem *Python 3*, utilizados para tratamento os dados.

| Ficheiro | Descrição |
|-------------------------|---|
| sli_localization_app.py | Utilizado para efetuar interface com a <i>tag</i> e enviar comandos para a mesma. |
| sli_mapping_gdop.py | Utilizado para efetuar a simulação do mapeamento dos valores de diluição de precisão (HDOP, VDOP e PDOP). |
| sli_teodelite.py | <i>Script</i> utilizado para efetuar a conversão dos valores obtidos pelo teodelito em formato de coordenadas cartesianas. |
| sli_pos_move.py | Utilizado para efetuar as análise às estimativas da posição dos testes em movimento. |
| sli_pos_plot.py | Utilizado para realizar a análise às estimativas da posição dos testes em modo estático. |
| sli_ranges.py | Utilizado para analisar os valores obtidas das distâncias, dos testes em modo estático. |
| sli_encoder.py | Utilizado para efetuar interface com o <i>Arduino Uno</i> para obtenção dos pulsos do <i>encoder</i> utilizado. |
| sli_gdop.py | <i>Script</i> que determina o valor da diluição de precisão (HDOP, VDOP e PDOP) para determinada posição. |
| sli_pos_itls.py | Utilizado para realizar as estimativas, dos testes, utilizando o ficheiro das distâncias medidas. |
| sli_algorithms.py | Possui os algoritmos testados durante o estudo realizado. |
| loading_data.py | Trata do carregamento dos ficheiros <i>csv</i> que contêm os dados das distâncias obtidas e as coordenadas das âncoras (<i>anchor_coordinates</i>). |

encoder (referência técnica: EC12E24204A8) foi adicionado ao tapete, para realizar a contagem dos pulsos nos testes elaborados. Utilizando uma roda dentada acoplada ao *encoder* por forma a acompanhar a locomoção do motor através da correia.

A obtenção dos pulsos deverá ser efetuada por forma a obter os valor dos tempos de ocorrência dos mesmos. Para tal código para o *Arduino UNO* foi elaborado e através do *script Python* (*sli_encoder.py*) é possível obter os tempos de aquisição de acordo com os pulsos ocorridos.



Figura 62: *Encoder* (retângulo azul) utilizado para contar os pulsos do tapete. A fixação foi feita no perfil de alumínio, através de uma pequena placa de circuito impresso, e a sua conexão a um *Arduino Uno* para detecção dos pulsos. Adicionalmente, para obter os pulsos através do movimento da correia, foi colocada uma roda dentada no eixo do encoder.

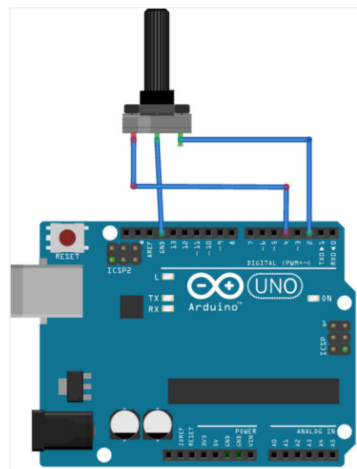


Figura 63: Representação da conexão entre o *Arduino* e o *encoder* utilizado.

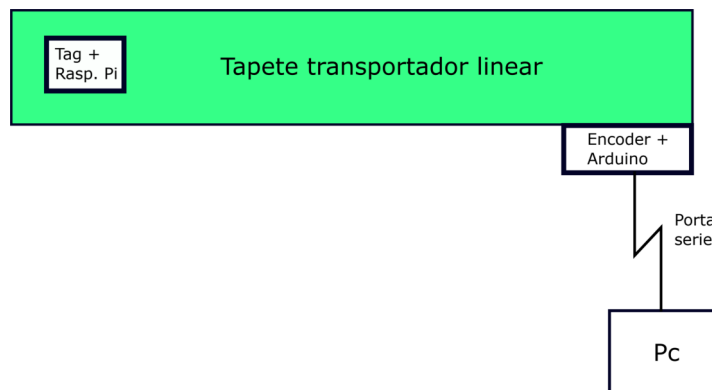


Figura 64: Representação dos testes dinâmicos elaborados, onde a *tag* se encontra conectada a um *Raspberry Pi* por forma a recolher as medições das distâncias durante o deslocamento e a conexão entre um computador ao Arduino que recolhe os pulsos provenientes dos encoder.

DECLARAÇÃO

Declaro, sob compromisso de honra, que o trabalho apresentado nesta dissertação, com o título “*Sistema de Localização em Ambiente Interior baseado em UWB*”, é original e foi realizado por Rui Miguel Vieira Gomes (2160133) sob orientação do Professor Luís Manuel Conde Bento (luis.conde@ipleiria.pt) e do Professor Hugo Filipe Costelha De Castro (hugo.costelha@ipleiria.pt).

Leiria, Março de 2022

Rui Miguel Vieira Gomes