

IPV - ESTGV |



Instituto Politécnico de Viseu

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu

Aos meus pais.

*“O caráter não pode ser desenvolvido na calma e tranquilidade.
Somente através da experiência de tentativas e sofrimentos
a alma consegue ser fortalecida, a visão clareada,
a ambição inspirada e o sucesso alcançado”*

Helen Keller

RESUMO

Esta dissertação apresenta uma técnica de localização baseada em Ultrassons para espaços confinados que recorre à transmissão de sinais OFDM periódicos. O uso de sinais OFDM permite tirar partido da periodicidade do sinal emitido para operar de forma contínua e autónoma. Adicionalmente através da utilização de um algoritmo de localização assíncrono baseado na diferença de tempos de chegada é possível estimar a localização com uma resolução na ordem dos centímetros. Para gerar os sinais, emitir, gravar e posterior tratamento do sinal gravado e localização foram utilizado quatro emissores acústicos, um microfone e uma placa de som conectada a um computador pessoal com o *software* Matlab. O sistema opera numa banda de frequências de 10 a 30 kHz, com uma precisão de alguns centímetros. No fim do trabalho foi obtido um sistema totalmente funcional, pronto a ser implementado num veículo autónomo ou em qualquer outro dispositivo que careça de localização.

ABSTRACT

This dissertation presents an ultrasound-based localization technique for confined spaces that uses periodic OFDM signal transmission. The use of OFDM signals makes it possible to take advantage of the periodicity of the emitted signal to operate continuously and autonomously. In addition, from the use of an asynchronous location algorithm based on the difference in arrival times is possible to estimate the localization with a accuracy in order of a few centimeters. To generate signals, emit, record and further processing of the recorded signal and localization was used, four speakers, a microphone and a sound card connected to a computer with Matlab software. The system operates in a frequency band from 10 to 30 kHz, with an accuracy of a few centimeters. At the end of the work, a fully functional system was made, ready to be implemented in an autonomous vehicle that needs location.

PALAVRAS CHAVE

AGV
Matlab
OFDM
Método de Newman
Papoulis-Gerchberg
TDOA

KEY WORDS

AGV
Matlab
OFDM
Newman Method
Papoulis-Gerchberg
TDOA

AGRADECIMENTOS

Aqui expresso a minha profunda gratidão a todos os que contribuíram para a realização da presente dissertação.

Ao meu orientador, Professor Daniel Filipe Albuquerque, pela sua orientação, inteira disponibilidade, pelos momentos de aprendizagem e por todo o incentivo dado ao longo da realização deste trabalho.

Aos meus pais que sempre primaram pela minha educação, um agradecimento muito especial por serem modelos de coragem, pelas suas palavras encorajadoras e de compreensão e total ajuda na superação dos obstáculos.

À minha namorada Ana Isabel Carvalho, pelas constantes demonstrações de amizade e carinho, e pelo seu apoio incondicional.

A todos o meu sincero Muito Obrigado.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	xv
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
ÍNDICE DE QUADROS	xix
ABREVIATURAS E SIGLAS	xxi
1. Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da dissertação	2
2. Sistemas de Localização em Espaços Confinados	4
2.1 Robôs Móveis	4
2.1.1 Tecnologia Usada num AMR	5
2.1.2 Localização de um AMR	6
2.2 Alternativas à Localização Espacial	6
2.2.1 Técnicas de Localização	7
2.2.2 Partilha do Meio	9
2.2.3 Tecnologias Usadas nos Sistema de Localização	12
2.3 Sistemas de Localização Baseados em Ultrassons	13
2.3.1 Sistema de Localização Active Bat	13
2.3.2 Sistema de Localização Cricket	14
2.3.3 Sistema de Localização Rivard	14
2.3.4 Sistema de Localização Parrot	14
2.3.5 Sistema de Localização Dolphin	15
2.3.6 Sistema de Localização 3D-Locus	15
2.3.7 Sistema de Localização Hazas	16
2.3.8 Sistema de Localização Gonzalez	17
2.3.9 Sistema de Localização D. Albuquerque	17
2.4 Comparação dos Sistemas de Localização Baseados em Ultrassons	18
3. Descrição do Sistema	21
3.1 OFDM	22

3.1.1	Escolha de fase do sinal OFDM.....	24
3.1.2	Deteção dos Sinais Emitidos.....	27
3.2	TDOA.....	29
4.	Implementação de Sistema de Localização por Ultrassons	32
4.1	Descrição do ensaio.....	32
4.2	Resolução do Sistema.....	33
4.3	Hardware Utilizado	34
4.3.1	Placa de Som ASUS XONAR U7.....	34
4.3.2	Amplificador ST TODA 7297	35
4.3.3	Speakers PW5120N	36
4.3.4	Microfone TRUST Primo	37
4.4	Programação Matlab.....	38
4.4.1	Obtenção do Sinal a Emitir	38
4.4.2	Emissão e Gravação	39
4.4.3	Algoritmo de Localização	41
4.5	Resultados dos Ensaios	42
5.	Conclusão e trabalhos futuros	46
5.1	Conclusão	46
5.2	Trabalhos futuros.....	46
	Referências.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Ilustração do método multilateração 2D [7].	7
Figura 2-2: Ilustração do método trilateração 3D.	8
Figura 2-3: Ilustração do método triangulação.	8
Figura 2-4: Ilustração protocolo TDMA [14].	10
Figura 2-5: Ilustração protocolo CDMA [14].	10
Figura 2-6: Ilustração protocolo FDMA [14].	11
Figura 2-7: Ilustração das bandas de guarda e atribuição de utilizador no protocolo FDMA [14].	11
Figura 2-8: Receção do sinal OFDM [16].	12
Figura 3-1: Diagrama de emissão e métodos propostos.	21
Figura 3-2: Diagrama de gravação e tratamento do sinal.	22
Figura 3-3: Seleção de frequência das subportadoras [29].	23
Figura 3-4: Multiplexação por Divisão de Frequência Convencional e Multiplexação de Divisão de Frequência Ortogonal [31].	23
Figura 3-5: Resultado do sinal OFDM gerado.	25
Figura 3-6: Diagrama ilustrativo do algoritmo de Papoulis-Gerchberg.	25
Figura 3-7: Resultado obtido dos valores PAPR em ordem ao número de iterações.	26
Figura 3-8: Sinal otimizado com 500 iterações, a azul o sinal original e a laranja o sinal otimizado.	26
Figura 3-9: Sinal otimizado com 10000 iterações, a azul o sinal original e a laranja o sinal otimizado.	27
Figura 3-10: Sinal otimizado com 100000 iterações, a azul o sinal original e a laranja o sinal otimizado.	27
Figura 3-11: Esquema de receção do sinal até à aplicação do produto de sinais.	29
Figura 3-12: Exemplo de sinais já filtrado após receção em Matlab.	30
Figura 3-13: Exemplo de eco do sinal.	30
Figura 3-14: Estrutura do <i>hardware</i> implementado.	32
Figura 3-15: Foto parcial do sistema implementado, é possível ver os amplificadores, 2 dos <i>speakers</i> , placa de som e microfone.	33
Figura 3-16: Placa de Som ASUS XONAR U7.	35
Figura 3-17: Fonte de Alimentação comum AC/DC de 12 V/60 W.	36
Figura 3-18: Amplificador ST TODA 7297.	36
Figura 3-19: Speakers PW5120N.	37
Figura 3-20: Microfone TRUST Primo.	38
Figura 3-21: Criação do sinal em OFDM, escolha de frequências e criação das fases.	39
Figura 3-22: Esquema de emissão de sinal.	39
Figura 3-23: Esquema de bloco de emissão.	40

Figura 3-24: Exemplo de seleção aleatória de um bloco de sinal recebido.	40
Figura 3-25: Esquema de obtenção de diferença de tempos de chegadas.	41
Figura 3-26: Esquema do método de localização implementado.	42
Figura 3-27: Erro da coordenada x na imagem da esquerda e erro da coordenada y na imagem da direita, para o teste a 24,5 cm do chão (valores apresentados em centímetros).....	43
Figura 3-28: Desvio de valores do 1º teste no eixo z em centímetros, para o teste a 24,5 cm do chão (valores apresentados em centímetros).....	43
Figura 3-29: Erro da coordenada x na imagem da esquerda e erro da coordenada y na imagem da direita, para o teste a 11 cm do chão (valores apresentados em centímetros).....	44
Figura 3-30: Desvio de valores do 2º teste no eixo z em centímetros, para o teste a 11 cm do chão (valores apresentados em centímetros).....	45

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2-1: Sensores com tecnologia AMR[2].	5
Quadro 2-2: Comparativo de tecnologias [3].	13
Quadro 2-3: Comparação de sistema de localização <i>indoor</i> baseados em ultrassons (Fonte: Adaptado de [27]).....	19
Quadro 4-1: Características da placa de som ASUS XONAR U7.	35
Quadro 4-2: Características do Amplificador ST TODA 7297.....	36
Quadro 4-3: Características dos Speakers PW5120N.	37
Quadro 4-4: Características do Microfone TRUST Primo.....	38
Quadro 4-5: Coordenadas dos speakers em centímetros.	42

ABREVIATURAS E SIGLAS

1D	One Dimensional
2D	Two Dimensional
3D	Three Dimensional Space
AC	Alternating current
AGV	Autonomous Guided Vehicle
AMR	Autonomous Mobile Robots
AOA	Angle of Arrival
CDMA	Code Division Multiple Access
CNC	Controlo Numérico Computorizado
DC	Direct Current
FFT	Fast Fourier Transform
GPS	Global Positioning System
ID	Identification
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IFT	Inverse Fourier Transform
LOS	Line Of Sight
LS	Location System
FDM	Frequency Division Multiplexing
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PAPR	Peak-To-Average Power Ratio
PC	Personal Computer
PLA	Polylactic Acid
PMEPR	Peak-To-Mean Envelope Power Ratio
RF	Radio Frequency
RFID	Radio Frequency Identification
RSSI	Received Signal Strength Indicator
TDMA	Time Division Multiple Access
TDOA	Time Difference of Arrival
TOA	Time of Arrival
TOF	Time of Fly
US	Ultrasound
UWB	Ultra Wideband

1. Introdução

Com a crescente aposta tecnológica tem-se assistido uma automatização dos setores produtivos que conduzem as empresas a uma maior produtividade pela redução de mão-de-obra e melhoria na qualidade dos processos [1].

A implementação de veículos autónomos em unidades industriais, tem vindo a ser uma mais-valia no abastecimento de cadeias produtivas, pelas razões acima referidas e aliadas ao facto de serem equipamentos seguros quando respeitadas as suas limitações. Atualmente os veículos autónomos mais utilizados em meio industrial são os AGV (Automated Guided Vehicle), estes seguem trilhos criados para a sua movimentação, apresentando uma alta confiabilidade, mas uma baixa flexibilidade para novas configurações. O substituto desta tecnologia está a aparecer no mercado, a tecnologia AMR, que permite a um veículo autónomo deslocar-se através de um espaço confinado de uma forma mais flexível [1].

Para que a sua navegação se torne mais precisa e segura é necessário um sistema de localização absoluto e com boa precisão. A tecnologia aqui descrita vai de encontro a estes requisitos. Ainda é possível a utilização desta tecnologia em meios hospitalares ou subaquáticos onde outras tecnologias (não baseadas em ultrassons) não conseguem [2].

1.1 Motivação

A maioria dos sistemas de localização desenvolvidos recorrem, para além de ultrassons, a um canal auxiliar de Rádio Frequência (RF) para sincronizar os relógios entre outras operações de comunicação e calibração. Alguns têm infraestruturas/dispositivos e processos que encarecem os mesmos, tornando-os economicamente inviáveis [3]. Sempre que são desenvolvidos e

implementados sistemas de localização, podem levantar questões sobre a privacidade dos utilizadores. Contudo o sistema implementado visa a ser um sistema que se localiza a si mesmo e não um sistema que “remotamente” seja localizado por outros. Dar-se a conhecer será uma decisão do utilizador e não de algum “supervisor”.

Outro ponto interessante é a escalabilidade do sistema proposto, uma vez que cada utilizador pode localizar-se de forma autónoma e não existe limite para o número de utilizadores. O sistema tira ainda partido da tecnologia de ultrassons na resolução do sistema. Quando comparado a sistemas RF, os ultrassons conseguem ter uma maior resolução métrica, derivado à baixa velocidade de propagação do sinal sonoro que se pode refletir em uma maior precisão do sistema [7].

1.2 Objetivos

Neste trabalho pretende-se implementar um sistema de localização simples, assíncrono, para espaços fechados (industriais e domésticos) que fornecerá a posição aproximada (x, y, z) de um determinado objeto. O sistema de localização a implementar deverá ser uma alternativa económica e versátil recorrendo a combinações de tecnologias existentes de baixo custo fornecendo uma precisão centimétrica. No final da dissertação pretende-se ter um protótipo 100% funcional de um sistema de localização capaz de fornecer a um AGV as suas coordenadas cartesianas. Para concretizar este objetivo final, existem objetivos intermédios que têm de ser satisfeitos, tais como:

- Estudo das alternativas concorrentes à localização sem fios para espaços confinados;
- Estudo das tecnologias de localização baseadas em ultrassons;
- Estudo da transmissão OFDM;
- Estudo de técnicas de localização assíncronas baseadas no TDOA;
- Implementação do sistema de ultrassons;
- Ambientação ao software Matlab;
- Realização de testes.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação é composta por cinco capítulos. O primeiro capítulo serve sobretudo de introdução e de organização para quem vai iniciar a leitura do documento, em que são explicados os objetivos e motivações do trabalho, assim como a estrutura do mesmo.

No segundo capítulo, começa-se por falar das tecnologias concorrentes ao sistema de ultrassons e as diferentes técnicas de localização sem fios. E termina com uma comparação dos principais sistemas de localização de ultrassons existentes.

No terceiro capítulo são apresentados os conceitos utilizados no trabalho, desde a criação do sinal OFDM até à sua otimização, passando pelo processamento de sinal. Por fim, é apresentado o algoritmo de localização implementado. Responde também aos porquês das técnicas adotadas.

O capítulo 4 mostra, em mais detalhe, todo o desenvolvimento prático. Desde a descrição do ensaio, à implementação do algoritmo, o equipamento utilizado e a demonstração de resultados.

O capítulo 5 é o espaço destinado às conclusões e propostas para trabalhos futuros.

2. Sistemas de Localização em Espaços Confinados

Neste capítulo apesar de começar por focar a tecnologia AGV/AMR, por ser uma aplicação de fácil entendimento, a tecnologia que será apresentada terá muitas potencialidades, em todos os sistemas confinados que necessitem de localização sem fios. Neste capítulo são apresentadas as diferentes formas de localização sem fios e as principais tecnologias utilizadas em espaços confinados.

De seguida serão apresentadas as principais técnicas de transmissão e localização, falando no TDOA e na transmissão OFDM, que serão as técnicas adotadas para a implementação do sistema. Por último é apresentado um resumo do estado da arte em localização sem fios usando ultrassons.

2.1 Robôs Móveis

Um AMR (Autonomous Mobile Robots) pode ser entendido como um robô que se desloca entre pontos estabelecidos de forma rotineira sem que seja necessária intervenção humana, ou apenas necessária para operações de configuração do robô. A tecnologia AMR tem-se tornado numa tecnologia emergente em muitas aplicações de diversos setores, industriais, agrícolas, hospitalares, e até mesmo nas nossas atividades diárias e das nossas casas. A sua capacidade de navegação num meio sem a necessidade de dispositivos externos para os guiar tem-nos tornado numa tecnologia cada vez mais promissora. A necessidade de se recorrer a esta tecnologia tem aumentado significativamente devido às tarefas e serviços que são capazes de executar, sobretudo em situações que seriam adversas para o ser humano, como por exemplo, a manipulação de cargas pesadas, operações de salvamento, missões de exploração ou operações

em ambientes adversos à condição de vida humana. As aplicações divergem, sendo que esta tecnologia pode ser encontrada no meio industrial, em operações rotineiras, com o objetivo de suprimir os custos com mão-de-obra [2].

O grande desafio é que estes veículos sejam sensíveis às alterações do meio envolvente e têm de ser capazes de reconhecer obstáculos fixos ou móveis, zonas transitáveis e não transitáveis, reconhecendo alternativas de percurso sem comprometer a segurança de pessoas, animais ou de equipamentos [2]. Para a utilidade do presente estudo vão ser consideradas aplicações em áreas cobertas e confinadas, tal como a generalidade dos meios industriais, ainda que os AMR possam ser utilizados em espaços abertos sobre água, terra e ar. Os meios sobre o qual os AMR se deslocam não tem implicações sobre a tecnologia de ultrassons, mas o espaço será sempre confinado pela infraestrutura adjacente à tecnologia, como se pode ver mais à frente nas implicações.

2.1.1 Tecnologia Usada num AMR

Um AMR é um sistema que opera em ambientes imprevisíveis e parcialmente desconhecidos, sem ou quase nenhuma intervenção humana, e por isso têm que ter a capacidade de navegar sem interrupções e evitar obstáculos dentro dos limites do seu espaço de trabalho. Para que o AMR execute a sua tarefa e consiga adaptar-se à sua área envolvente é necessário que este possua uma vasta gama de sensores internos [2]. No Quadro 2-1 são apresentados os sensores que podem compor um AMR, podendo variar em função da aplicação.

Quadro 2-1: Sensores com tecnologia AMR[2].

Classificação	Sistema Sensor	Função
Sensores táteis	<ul style="list-style-type: none"> • Contactos <i>Switch</i> • Sensor <i>Bumpers</i> 	São utilizados para determinar a posição exata de um objeto através de um contacto físico. Também são utilizados para detetar variações de calor. Os sensores de contacto são mais utilizados para estimar a força aplicada pelos robôs.
	<ul style="list-style-type: none"> • Sensores de barreira • Sensores de proximidade 	
<i>Encoders</i> nas rodas	<ul style="list-style-type: none"> • Óticos • Magnéticos 	Servem para medir a distância percorrida ou velocidade dos robôs. Também conseguem determinar a orientação do robôs através do desfasamento de rotação nas rodas.
Sensores óticos	<ul style="list-style-type: none"> • Infravermelho • LiDAR 	Estes sensores medem a distância aos objetos através do tempo de voo da luz.
Sensor de direção	<ul style="list-style-type: none"> • Giroscópio 	Mede velocidade angular e orientação dos robôs.
Sensores de visão	<ul style="list-style-type: none"> • Câmara de Vídeo 	Estes sensores oferecem uma vasta gama de informações sobre o ambiente e possibilitam a interação inteligente em ambiente dinâmico.

Sensores de variação ativa	<ul style="list-style-type: none">• Ultrassônicos• Telémetro laser• Triangulação ótica	Sensores de alcance ativos auxiliam na navegação dos robôs e geralmente são parte da localização e modelação ambiental. São dispositivos que geram medições de distâncias altamente precisos entre o sensor e o alvo.
----------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Todos estes sensores aliados a uma programação robusta baseada em algoritmos permitem ao AMR cruzar a informação proveniente de sensores e ter uma percepção o mais aproximada possível do meio, garantido a fiabilidade do equipamento.

2.1.2 Localização de um AMR

Em [4] são definidos os elementos básicos da mobilidade robótica como a locomoção, percepção e navegação, apontando esta última como o maior desafio da aplicação. Refere ainda que a localização varia entre a localização relativa e absoluta [2]. A relativa é conseguida através de sensores internos do robô e que apenas pode ser utilizada por um curto espaço. A absoluta é feita a partir de referências externas, que consiste em marcas que possam ser detetáveis pelo robô para sobrepor ou validar a sua posição. Pode ser também conseguida através de uma infraestrutura externa, como no caso da utilização de GPS [2].

Como foi apresentado na secção anterior uma localização ineficiente pode implicar problemas a nível de segurança, funcionamento e precisão. No caso dos AMR a localização varia entre malha aberta e fechada, ou entre posição relativa e absoluta. Sendo que o robô se pode mover sem ter *feedback* da posição ainda que por curtos períodos de espaço. Isto remete para uma fragilidade e limitação dos AMR. O atual sistema GPS, segundo dados oficiais do governo dos Estados Unidos da América aponta para uma precisão de 4,9 metros em céu limpo, estando esta tecnologia também limitada a espaços abertos devido a perturbações relacionadas com o meio envolvente [5]. Por estes motivos é legítimo dizer que, em grande parte, não será a melhor tecnologia a implementar nos AMR para determinar a sua posição absoluta. Um sistema baseado em ultrassons pode ser implementado para suprimir esta fragilidade e limitação do atual sistema AMR. No entanto existem outras tecnologias capazes de dar resposta para sistemas fechados através de ondas magnéticas com vantagens e desvantagens relativas aos ultrassons.

2.2 Alternativas à Localização Espacial

Como alternativa, para sistemas de localização em espaços confinados sem fios, existem algumas tecnologias existentes no mercado, utilizando na sua maioria ondas rádio. Das tecnologias existentes destacam-se as seguintes:

- WI-FI;

- UWB (Ultra wideband);
- Ultrassons.

Apesar de se falar de técnicas de transmissão diferenciadas, elas acabam por partilhar os mesmos métodos de obtenção de coordenadas, uma vez que todas elas têm em comum o sinal que é conseguido através da análise da propagação de uma onda, quer esta seja mecânica ou eletromagnética. Os métodos mais precisos para obter as coordenadas baseiam-se na multilateração, trilateração e triangulação. Para isto é sempre necessária uma estrutura composta por *Beacons* (âncoras), no mínimo 3, com uma posição espacial conhecida [6]–[8].

2.2.1 Técnicas de Localização

A multilateração (ou posicionamento hiperbólico) utiliza a diferença do tempo de chegada (TDOA) para estimar a localização do objeto móvel relativamente a vários pares de *Beacons*. O método TDOA traduz a diferença do tempo de chegada do sinal entre um sensor e outro. Para determinar a posição 3D é necessária uma estrutura composta por quatro *Beacons* (âncoras ou nós estáticos) com uma posição espacial conhecida. Em cada um dos *Beacons* são formadas hipérbolas com o raio correspondente à distância ao objeto e a sua localização é dada pela zona de interseção das hipérbolas como é demonstrado Figura 2-1. A multilateração é tipicamente usada em sistemas não sincronizados e é normal em sistemas de medição TDOA como se pode ver mais à frente [6]–[8].

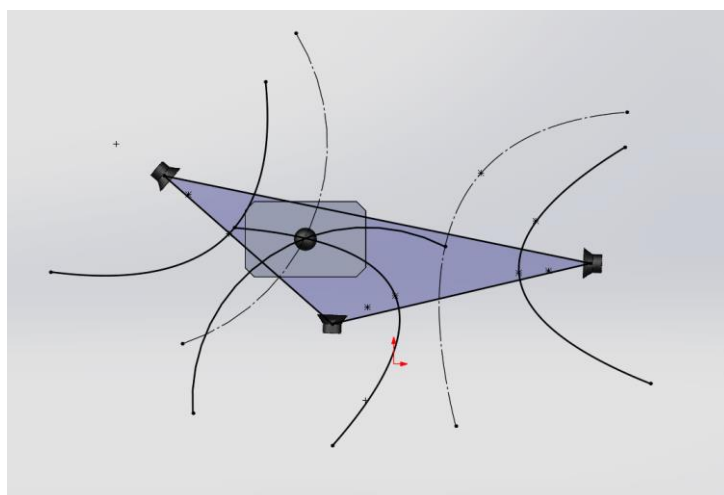


Figura 2-1: Ilustração do método multilateração 2D [7].

Para determinar a localização podemos ainda fazer recurso à trilateração ou à triangulação. De forma homóloga também iremos necessitar das distâncias entre *Beacons* e o objeto. No entanto, o cálculo é executado a partir da distância absoluta entre eles. Para o caso da trilateração o processo de cálculo é parecido ao da multilateração, contudo considera para o cálculo da posição do objeto, os pontos de interseção de círculos, em vez de hipérbolas, como é ilustrado

na Figura 2-2. Cada Beacon tem um círculo de atuação cujo o centro é a posição do sensor [6]–[8].

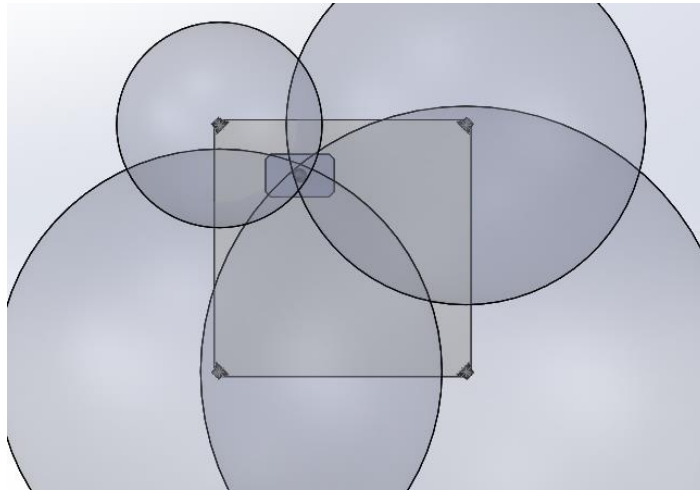


Figura 2-2: Ilustração do método trilateração 3D.

No caso da triangulação, diferentemente da trilateração e da multilateração, este método utiliza o valor dos ângulos formados entre os *Beacons* e o objeto, cuja posição é desconhecida, como é demonstrado na Figura 2-3. Este método baseia-se na aplicação do cálculo de técnicas e relações trigonométricas para determinar a localização do objeto. O facto de apenas necessitar de três *Beacons* para uma localização 3D, apresenta uma grande vantagem comparativamente com os métodos de trilateração e da multilateração [6]–[8]. Este método utiliza os conceitos do AoA (Angle of Arrival) para determinar os ângulos.

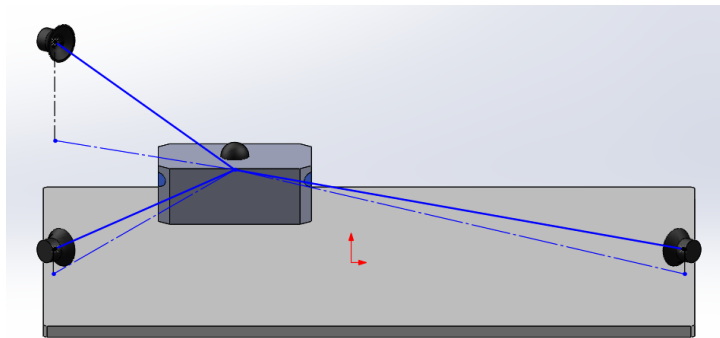


Figura 2-3: Ilustração do método triangulação

Para determinar a distância de um objeto móvel relativamente aos *Beacons* existem diferentes tecnologias possíveis, destacando-se, o AOA (Time of Arrival), o TOA (Time of Arrival), o TDOA (Time Difference of Arrival), o TOF (Time of Flight) e o RSSI.

AOA consiste na medição do ângulo do sinal recebido no objeto móvel em relação a uma predeterminada direção fixa. Este valor é determinado pela diferença de fase obtida nos diferentes *Beacons* [7].

O método TOA (Time of Arrival), mede a diferença do tempo que o sinal foi emitido pelos *Beacons* e recebido pelo objeto móvel. Este método de obtenção de distâncias exige que haja sincronismo temporal entre os *Beacons* e o objeto. A precisão vai depender muito da precisão deste sincronismo [7].

O método TOF (Time of flight), usa o tempo de voo do sinal desde que ele é emitido até quando é recebido de novo no emissor original. Este método não exige sincronismo temporal uma vez que é tudo processado no mesmo dispositivo, o que diminui a complexidade do sistema. Para uma maior precisão, alguns sistemas introduzem um atraso (conhecido) do lado do recetor [7].

O método TDOA (Time Difference of Arrival) baseia-se na diferença do tempo de chegada de um sinal nos diferentes recetores para calcular a distância entre eles. Para calcular essa diferença de tempo corretamente, os recetores necessitam de ter relógios precisos e sincronizados. Ao contrário do TOA, este método não necessita de sincronização entre os nós recetores e os nós de referência, apenas necessita de sincronização entre os recetores. Após a determinação de três valores e recorrendo ao método de multilateração é possível calcular a posição do emissor [9].

Existe ainda sistemas de localização baseados na intensidade de sinal conhecidos por RSSI (Received Signal Strength Indicator), no entanto são sistemas de baixa precisão. Os sistemas de localização RSSI podem ser encontrados em sistemas de localização WI-FI ou Bluetooth, normalmente fazendo o *tracking* de pessoas em centros comerciais. Pelas combinações de intensidade de sinal recebido pelos diferentes *Beacons* é possível estimar a posição do objeto móvel [10].

2.2.2 Partilha do Meio

Uma das técnicas mais utilizados para garantir a ortogonalidade é o TDMA (Time Division Multiple Access). O TDMA é um protocolo de acesso ao canal que faz a separação dos diferentes sinais no domínio do tempo. Basicamente o canal é dividido em intervalos de tempos, onde há um intervalo de tempo atribuído a cada nó transmissor, como é representado na Figura 2-4, e com uma sequência conhecida. Cada nó só pode transmitir dados durante esse intervalo de tempo atribuído, evitando assim problemas de interferência. Após cada transmissão, existe um pequeno tempo de guarda para sincronizar a rede e este tempo adicional também garante que o sinal transmitido pelo transmissor anterior foi recebido. Esta técnica é necessária nos sistemas ultrassónicos porque após a transmissão de um sinal, este pode ainda estar a propagar-se no meio, e interferir com o sinal emitido do transmissor seguinte. O TDMA necessita de sincronização entre os nós transmissores e, uma vez que cada nó transmite em intervalos de tempo definidos, a transmissão com o protocolo TDMA é pulsada e não contínua como no FDMA [11], [12] [13].

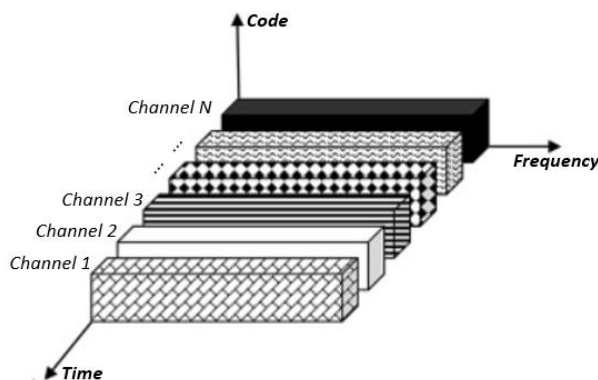


Figura 2-4: Ilustração protocolo TDMA [14].

O segundo método utilizado para garantir a ortogonalidade é o CDMA (Code Division Multiple Access). No CDMA todos os utilizadores podem transmitir simultaneamente em toda a faixa de frequência, como é demonstrado na Figura 2-5. Para que a ortogonalidade seja cumprida este método atribui a cada nó um código que é mutuamente ortogonal aos outros códigos do sistema. Cada utilizador recebe uma sequência de código exclusiva e isso permite que os sinais sejam transmitidos simultaneamente sem interferir uns com os outros. Os sistemas CDMA típicos utilizam códigos como códigos Gold e códigos Kasami porque apresentam uma correlação cruzada próxima de zero. Um problema que pode ocorrer é o *near-far*. Este problema ocorre quando um recetor tem problemas em detetar um sinal mais fraco na presença de um sinal mais forte. Quando são transmitidos dois sinais com a mesma potência e um dos nós estiver muito mais distante que o outro nó, o sinal do nó mais distante será muito mais fraco no recetor, e provocar um aumento da relação sinal-ruído (SNR) podendo “afogar” o sinal [11], [13].

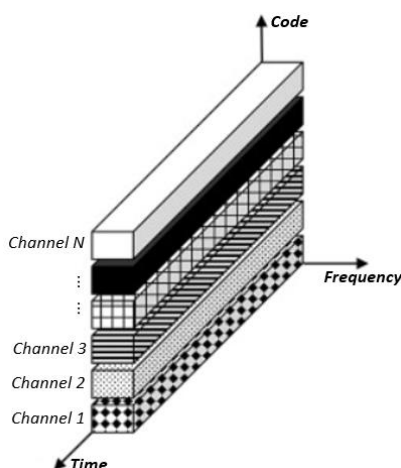


Figura 2-5: Ilustração protocolo CDMA [14].

O protocolo FDMA (Frequency Division Multiple Access) é um método de acesso ao canal que divide o espectro de frequência, como é ilustrado na Figura 2-6. Este método divide a largura de banda do canal em várias bandas de frequência não sobrepostas. Cada nó é alocado a uma sub-banda para o envio contínuo de informações, e essa banda é reservada exclusivamente para

esse nó durante todo o tempo de conexão. Uma vez que todos os nós operam em bandas de frequências não sobrepostas, não há interferência entre os sinais, assim, todos os nós transmissores podem transmitir continuamente e simultaneamente [14], [15].

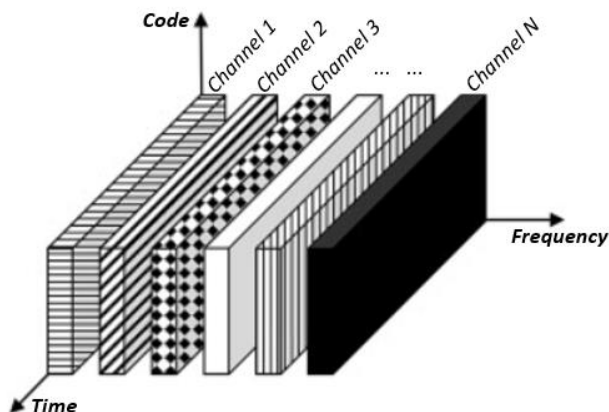


Figura 2-6: Ilustração protocolo FDMA [14].

Para evitar interferências, as bandas atribuídas são separadas umas das outras por pequenas bandas de frequência não utilizadas, ou por intervalos de frequência, denominadas por bandas de guarda, que garantem que as sub-bandas não se sobreponham, como é apresentado na Figura 2-7. Contudo a utilização de bandas de guarda restringe a capacidade do sistema no número de nós transmissores, sobretudo se o canal de informação for de banda estreita [14], [15].

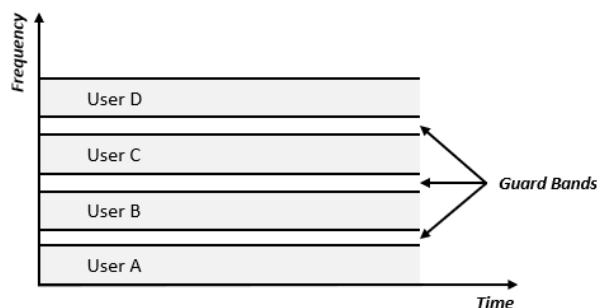


Figura 2-7: Ilustração das bandas de guarda e atribuição de utilizador no protocolo FDMA [14].

Para o sistema implementado vai ser usado o protocolo OFDM, também conhecido por OFDMA, sendo uma derivação do FDMA. Este protocolo não necessita de banda de guarda e opera com a sobreposição espectral de subportadoras. Apesar da sobreposição espectral é possível individualizar cada uma das subportadoras uma vez que existe ortogonalidade entre elas. Isto significa que cada subportadora é independente das restantes e, portanto, pode ser individualizada. Como vemos na Figura 2-8, as subportadoras são colocadas de maneira a que quando o pico de uma acontece, as restantes assumem o valor de 0 [16].

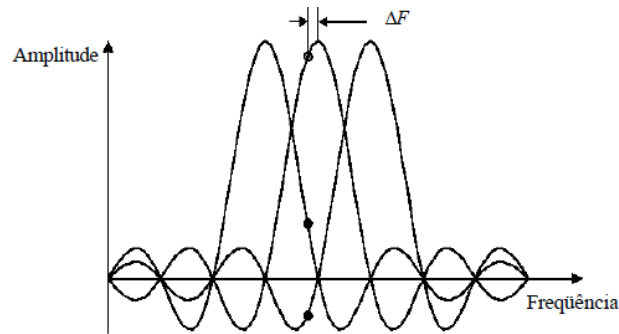


Figura 2-8: Recepção do sinal OFDM [16].

2.2.3 Tecnologias Usadas nos Sistema de Localização

Uma grande diferença entre os sistemas baseados em ultrassons e os sistemas baseados em ondas eletromagnéticas é a velocidade de propagação do sinal. Para o caso de ondas eletromagnéticas é utilizada a velocidade da propagação da luz, c , sendo o seu valor aproximadamente [13]:

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (2-1)$$

Para os sistemas baseados em ultrassons a velocidade é dada pela velocidade de propagação do som no meio em causa, que, para o ar a uma temperatura de 20°C, é de:

$$v_{som} = 331,45 \times 1,04 \approx 344 \text{ m/s} \quad (2-2)$$

Aqui é possível perceber, pela grande diferença de velocidade, que os sistemas de ultrassons acabam por oferecer mais precisão porque funcionam com uma resolução temporal muito maior. Por exemplo, o tempo de voo para um objeto que se encontra a cerca de 500 metros do *Beacon* para sistemas baseados em ondas rádio seria aproximadamente:

$$t_{voo} = 1,7 \times 10^{-6} \text{ s} \quad (2-3)$$

Para ultrassons o tempo de propagação seria aproximadamente de 1,5 segundos. Isto confere aos sistemas ultrassons mais precisão [7].

Todos os sistemas de localização espacial são sensíveis a obstáculos, eles trabalham na LOS (Line Of Sight) ou seja, sempre que surgem obstáculos o sistema fica comprometido a nível de precisão ou mesmo de funcionamento. No entanto a tecnologia ultrassons é a mais afetada neste aspeto, onde a onda é severamente atenuada quando tem de atravessar obstáculos [17].

No Quadro 2-2 está apresentada uma comparação resumida entre as tecnologias de localização anteriormente mencionadas. Como é possível verificar o sistema de localização com maior

precisão é o sistema baseado em ultrassons, com uma precisão de aproximadamente 2 cm, que contrasta significativamente com as restantes tecnologias apresentadas, para além do seu baixo custo de implementação.

Quadro 2-2: Comparativo de tecnologias [3].

Tecnologias	WI-FI	UWB	Ultrassons
Precisão	1,79 m	0,21 m	0,021 m
Custo	Custo muito Elevado	Custo elevado	Baixo Custo
Consumo Energético	<550mW	>100mw	<100mW
Taxa de atualização de posição	Contínuo em RSSI. Demora 4,298 seg. até à primeira conexão.	10 P/segundo	20 P/segundo

Os valores apresentados para os Ultrassons e UWB são baseados no método TDOA enquanto para o WI-FI é baseado em RSSI que é a configuração mais comum desta tecnologia.

2.3 Sistemas de Localização Baseados em Ultrassons

Nesta secção são apresentados nove sistemas de localização diferentes baseados em ultrassons: o sistema de localização Active Bat, o sistema Cricket, o sistema de localização de F. Rivard e et al., o sistema Parrot, o Dolphin, o sistema 3D-LOCUS, o sistema de localização M. Hazas e A. Hopper, o sistema J. Gonzalez e C. Bleakley e o sistema de localização de D. Albuquerque.

2.3.1 Sistema de Localização Active Bat

O Active Bat [18] é um sistema de localização baseado na técnica ToA que utiliza sinais de ultrassons (US) e um canal auxiliar de Rádio Frequência (RF). Este sistema é constituído por um conjunto de nós móveis, denominados por *Bats* que emitem sinais de ultrassons, e por uma rede de sensores normalmente montados no teto, equidistantes, designados por recetores de referência. Através de uma estação RF o sistema envia uma mensagem de rádio através do canal RF auxiliar para a rede que identifica o *Bat* a localizar e que permite o sincronismo entre os *Bats* e os recetores de referência. Como resposta ao sinal transmitido pela estação RF, o *Bat* envia um pulso de ultrassons de 50 μ s a 40 kHz para os recetores de referência e estes com base no método TDOA determinam a diferença temporal entre o sinal RF pela estação e o sinal de ultrassons emitido pelo *Bat*. As medições efetuadas são enviadas para um controlador central que calcula a posição do *Bat* com base no algoritmo de multilateração. Este sistema apresenta uma precisão de 8 cm em 98% dos casos.

2.3.2 Sistema de Localização Cricket

O sistema Cricket [19] à semelhança do sistema Active Bat também utiliza a diferença temporal entre os sinais ultrassons e sinais RF para determinar a localização do dispositivo móvel. Neste sistema existem dois tipos de *Cricket*, os *Beacons* e os *Listeners*. Os *Beacons* (tipicamente instalados no teto ou em paredes) são emissores de ultrassons e de RF que funcionam como nós de referência. Estes emissores enviam aleatoriamente um sinal de RF e um pulso de ultrassons de 125 μ s a 40 kHz. O sinal RF contém a localização do emissor e a sua identificação. Os *Listeners* são os dispositivos móveis que recebem o sinal de RF e o pulso de ultrassons de cada emissor, calculando a própria posição com base no desfasamento temporal (TOF) entre os dois sinais recebidos, isto porque, a velocidade do sinal RF é muito superior à velocidade do som, criando um desfasamento. O sistema Cricket para além de permitir a privacidade dos utilizadores (*Listeners*), consegue fornecer uma precisão de 10 cm.

2.3.3 Sistema de Localização Rivard

O sistema F. Rivard et al. [20] é um sistema móvel de posicionamento relativo de ultrassons desenvolvido para funcionar com múltiplos robôs, em que cada robô é equipado com um transmissor de ultrassons, três recetores e um canal de comunicação auxiliar RF. Este sistema permite calcular para cada robô as distâncias e os ângulos dos robôs circundantes em relação uns aos outros. Os recetores encontram-se montados nos robôs móveis e não em posições fixas e conhecidas do meio, como noutros sistemas de localização. O sistema utiliza os sinais de ultrassons (25,7 kHz) e de RF (433,92 MHz) emitidos pelos transmissores para medir a distância (TOF) e o ângulo entre os robôs retornadas pelos seus recetores. Simultaneamente, através do canal RF, a emissão é sinalizada aos outros robôs para evitar interferências entre os pulsos de ultrassons enviados. Este sistema apresenta um erro médio absoluto de 8 mm e 3 graus.

2.3.4 Sistema de Localização Parrot

O sistema Parrot [21] consiste numa rede de nós em que cada nó consegue calcular a sua localização com base nas informações partilhadas com os outros nós. Os nós Parrot são compostos por um microcontrolador, um canal RF auxiliar, para a comunicação de dados, e quatro pares de sensores de ultrassons com uma frequência de 40 kHz. Dentro da rede, cada nó envia um pulso de ultrassons e um sinal RF, e os restantes nós que recebem esses sinais convertem a diferença de tempo entre a receção dos dois sinais numa distância utilizando o método TOF. Inicialmente, o sistema dispõe aleatoriamente os nós numa fila, onde o primeiro nó da sequência tem a função de iniciador. Este nó emite um pulso de ultrassons e um sinal RF e os restantes nós, calculam a sua distância relativamente a este nó através do TOF. Quando a transmissão é finalizada o primeiro nó é colocado no fim da fila e o processo repete-se para o nó seguinte, e assim sucessivamente. Sempre que ocorre uma nova transmissão a fila é atualizada, podendo agregar, caso existam, novos nós ou nós recém-ativados. Esta informação

também é transmitida aos restantes nós para garantir a sincronização da rede. No sistema Parrot, todos os nós conseguem calcular a sua própria localização uma vez que partilham entre si, através do sinal RF, todas as informações nomeadamente, as distâncias calculadas e a sua localização. Por isso, não necessitam de um sistema central, reduzindo a sua complexidade, sendo classificado como um sistema distribuído. Este sistema apresenta uma precisão de 2 cm e tem um alcance de 15 metros.

2.3.5 Sistema de Localização Dolphin

O sistema Dolphin [22] [23] é um sistema de nós em que é possível determinar a localização de todos os nós. Para isso cada nó é composto por um par de sensores de sinais de ultrassons e outro par de sinais RF, e que têm como função a transmissão e receção dos sinais. O sistema Dolphin ainda é dotado de um CPU central que calcula a localização dos nós com base nas medições efetuadas da receção dos sinais de ultrassons, utilizando o protocolo TDOA. Neste sistema existem dois tipos de nós: os nós de referência, que são nós fixos em que o sistema conhece a sua localização, e os nós normais cuja localização é determinada pelo algoritmo. Neste sistema, os nós podem desempenhar a função de nós mestres, nós transmissores e nós recetores cuja localização é desconhecida. No entanto só os nós com posição conhecida é que podem tornar-se em nós mestres ou transmissores. Cada nó possui um ID exclusivo para comunicação RF, uma lista dos nós com posição conhecida, para seleção dos nós transmissores, e uma tabela de posição para guardar o valor das distâncias calculadas e da localização dos nós.

O nó mestre seleciona um nó da rede com base na lista de nós e emite uma mensagem com o ID desse nó. A cada ciclo de posicionamento, o nó mestre envia uma mensagem RF para sincronizar os nós do sistema, e todos os nós que estão ao seu alcance, incluindo outros nós transmissores, passam a ser nós recetores e quando recebem o sinal emitido, iniciam um contador de pulso interno. O nó que recebe essa mensagem e cujo seu ID coincide com o ID transmitido passa a ter função de nó transmissor e gera um pulso de ultrassons. Quando os restantes nós recebem o sinal de ultrassons, param o contador interno, calculam sua distância relativamente ao nó transmissor, através do TOF, e armazenam na sua tabela a localização e a distância ao nó transmissor.

Se algum dos nós recetores conseguirem determinar a sua localização, com base em três ou mais distâncias, é adicionado na lista de cada nó com o seu respetivo ID e passa a ser candidato a nó transmissor no próximo ciclo de posicionamento. Isto significa que os nós podem determinar a sua localização sem comunicarem diretamente com os nós de referência. O seu alcance é apenas de 3 m e apresenta uma precisão de 2 cm.

2.3.6 Sistema de Localização 3D-Locus

O 3D-Locus [24] é um sistema de localização centralizado que opera numa gama de frequências entre os 5 e os 25 kHz para medir as distâncias utilizando o TOF. A tecnologia implementada

em cada nó depende como estes estão conectados ao nó central, podendo ser: por cablagem em que todos os dispositivos móveis são interligados com o nó central através de uma rede BusCAN para a transferência de dados e de um barramento LVDS para a sincronização; ou com tecnologia Bluetooth para a comunicação de dados e de um sinal RF de 433 MHz para a sincronização. Este sistema pode operar em dois modos de acesso: acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA) ou acesso múltiplo por divisão de código (CDMA). Para os dois modos, é utilizado o espectro de dispersão de sequência direta (DSSS) modulado com chaveamento de deslocamento de fase binário (BPSK). O sistema na configuração normal consiste em uma rede de sensores montados no teto, conectados por fios a um nó central e por alguns nós móveis que são interligados por RF. O sistema pode funcionar com três configurações diferentes: Centralizado, onde os nós móveis atuam como emissores, enviam um pulso de ultrassons e o nó central determina a sua posição. Orientado à privacidade, em que os nós fixos à estrutura atuam como emissores, ou seja, enviam um pulso de ultrassons e cada nó móvel calcula a sua posição; ou bidirecional em que todas os nós, móveis e fixos, funcionam como emissor. Uma das particularidades deste sistema é a sua capacidade de calcular a velocidade do som. Para o modo TDMA, o sistema apresenta uma precisão de 4,1 a 5,2 mm em 90% dos casos, e de 8,6 a 11 mm para o modo CDMA. Com um fluxo de vento de 2 m/s a precisão do sistema diminui para o intervalo de 4,9 a 11,5 mm em 90% dos casos para o modo TDMA e de 7,5 a 13,7 mm para o modo CDMA.

2.3.7 Sistema de Localização Hazas

O sistema de localização proposto por Hazas e Hopper [25] ao contrário de alguns sistemas de localização com ultrassons mencionados anteriormente não utiliza um canal auxiliar RF para a sincronização, isto porque, utiliza transdutores ultrassons de banda larga para efetuar a localização 3D. Este sistema tem duas formas diferentes de operar: centralizado ou privado. No primeiro modo, o sistema utiliza uma rede de *tags* receptoras fixas e com posições conhecidas e as *tags* que o sistema pretende localizar transmitem ao mesmo tempo um pulso de ultrassons de banda larga. Os testes demonstram que neste modo este sistema tem uma precisão 2,1 cm em 95% dos casos. No modo privado, o sistema pode trabalhar de duas formas diferentes, síncrono e assíncrono. No modo síncrono, como o próprio nome indica, o sistema tem que ser sincronizado e para isso necessita de um canal auxiliar de RF. No modo assíncrono, para determinar a localização de uma *tag* é necessária a implementação de *tags* transmissoras posicionados em locais fixos e com posição conhecida que tem como função transmitir simultaneamente um pulso de ultrassons de banda larga. No modo síncrono o sistema tem uma precisão de 5 cm em 95 % dos casos e no modo assíncrono apresenta uma precisão de 25 cm para mesma percentagem de casos. Este sistema é um sistema preciso e apresenta uma boa escalabilidade em ambos os modos, no entanto quando trabalha sem o canal auxiliar RF a precisão é muito reduzida.

2.3.8 Sistema de Localização Gonzalez

O sistema de localização proposto por Gonzalez [26] é um sistema de localização e de orientação 3D que utiliza sinais ultrassônicos e um canal auxiliar RF para a sincronização das *tags*. Este sistema é constituído por um conjunto de *tags* fixas, com posição conhecida, que transmitem sinais de ultrassons de banda larga para o dispositivo móvel (*tag*), usando o espectro de propagação de salto de frequência (FHSS).

As estações com posição desconhecida determinam a sua localização e orientação através de uma extensão do algoritmo MUSIC e de medições para estimar o tempo de voo (TOF) e o ângulo de chegada (AOA) dos sinais. Para isso todas as *tags* são sincronizadas por um sinal RF. Para o cálculo do AoA as *tags* utilizam uma matriz circular uniforme (UCA) de 8 sensores/transdutores ultrassônicos baseados na tecnologia de micro sistemas eletromecânicos (MEMS) que podem operar de 10 a 65 kHz. Com base nessas estimativas as *tags* móveis determinam a sua própria localização e orientação relativa ao sistema de coordenadas de referência. Como determinam a sua própria posição a privacidade do utilizador é mantida. O sistema tem uma precisão de 1 cm em 95% dos casos e um erro médio de 4.5° na sua orientação. É um sistema com elevada precisão, no entanto não está completamente funcional [26]–[28].

2.3.9 Sistema de Localização D. Albuquerque

O sistema de localização de localização proposto por D. Albuquerque [27] é um sistema de localização *indoor* distribuído baseado exclusivamente em sinais de ultrassons para obter a localização do nós móveis sem recorrer a um canal auxiliar de RF ou cabos entre os *Beacons*. Os sinais de ultrassons são utilizados para calcular a distância dos nós móveis, através do tempo de voo (TOF), e também para a implementação de comunicação de dados, através da multiplexação por divisão de frequência ortogonal (OFDM) e pelo diferencial BPSK (DBPSK). Uma vantagem deste sistema é o design do pulso de ultrassons. Este pulso é robusto para ambientes com *multipath* forte quando usado para medir o TOF e transmitir dados [27].

Este sistema é constituído por uma rede de *Beacons* fixos no teto ou numa parede de um compartimento, e por um conjunto de nós móveis com localização desconhecida relativamente ao espaço desse compartimento. Os *Beacons* são nós fixos, com relógio síncrono, que conhecem a sua localização e que fornecem as suas coordenadas aos nós móveis. Os nós móveis calculam a sua posição através da informação fornecida pelos *Beacons*. Na rede de *Beacons* existem também *Beacons* especiais, designados por *Beacons* âncoras com posição conhecida, previamente definidos pelo utilizador, e que servem de referência para os restantes *Beacons* da rede calcularem a sua posição [27].

Este sistema utiliza um protocolo de sincronização, baseado no protocolo de TPSN. Este protocolo permite a sincronização dos relógios dos *Beacons*, como também permite que um

Beacon conheça não apenas a distância aos seus vizinhos, como também a distância entre vizinhos, trocando apenas três mensagens de tempos a tempos [27].

Os nós móveis calculam a sua própria localização utilizando um algoritmo baseado na diferença do tempo de chegada (TDOA). Este algoritmo usa os sinais ultrassons recebidos dos *Beacons* com a informação da data e a hora e da sua localização. Uma vantagem deste sistema é que os nós móveis não precisam de ter nenhuma informação sobre a rede de *Beacons*, ou sejam são independentes e calculam a sua localização utilizando apenas as informações fornecidas pelo pulso de ultrassons que é enviado pela rede de *Beacons*. Uma vez que os nós móveis não necessitam de transmitir qualquer mensagem para determinar a sua posição confere ao sistema um elevado nível de privacidade [27].

Este sistema é um sistema de localização por ultrassons, livre de RF, com um tempo de configuração reduzido e de baixo custo de manutenção, onde os nós com falhas, podem ser substituídos sem a necessidade de um técnico qualificado. Quanto à escalabilidade do sistema, os nós móveis são responsáveis por calcular a sua própria localização através das mensagens recebidas da rede de *Beacons*, o que significa que não há limite para o número de nós móveis. Outra particularidade deste sistema é a facilidade com que a rede pode ser expandida, sendo apenas necessário instalar novos *Beacons* à rede. Este sistema apresenta uma precisão de 2 cm e opera numa banda de frequência de 30 a 50 kHz [27].

2.4 Comparação dos Sistemas de Localização Baseados em Ultrassons

No Quadro 2-3 é apresentada uma comparação entre os sistemas de localização por ultrassons mencionados nos tópicos acima. Para cada sistema é apresentada a precisão do sistema, o método de medição, a escalabilidade do sistema, a estrutura e o custo de implementação.

A escalabilidade do sistema é apresentada qualitativamente como Nenhum, Algum e Alto. Quanto ao modo este pode ser central, se a localização dos nós for calculada por um computador central ou Local, se cada nó calcular a sua localização. O custo do sistema pode ser Barato ou Caro [27].

Quadro 2-3: Comparação de sistema de localização *indoor* baseados em ultrassons (Fonte: Adaptado de [27])

Sistema	Precisão	Método de Medição	Escalabilidade	Estrutura	Custo
<i>Active Bat</i>	8 cm	TOA	Alguma (expand a dense sensor network)	Central	Cara
<i>Cricket</i>	10 cm	TOF	Alguma (expand the sensor network)	Local	Barato
<i>Rivard</i>	8 mm 3°	TOF AOA	Elevada (add a new tag)	Local	Barato
<i>Parrot</i>	2 cm	TOF	Elevada (add a new tag)	Local	Barato
<i>Dolphin</i>	2 cm	TDOA	Elevada (add a new tag)	Local	Barato
<i>3D-Locus</i>	4,1 a 5,2 mm (TDMA) 8,6 a 11 mm (CDMA)	TOF	Some (expand the sensor network)	Central	Caro
<i>Hazas</i>	5 cm		Elevada (expand a simple sensor network)	Central ou Local	Barato
<i>Gonzalez</i>	1 cm	TOF AOA	Elevada (expand a simple sensor network)	Local	Sensores Caros
<i>D.Albuquerque</i>	2 cm	TOF TDOA	Elevada (simples expansão de <i>Beacons</i> e sem número limite de nós móveis)	Local	Barato

Como foi referido anteriormente, a maioria dos sistemas de localização por ultrassons recorrem a um canal auxiliar RF para calcular o atraso na propagação da onda desde a fonte emissora até ao recetor. Os *Beacons* enviam ao mesmo tempo um pulso US e um pulso RF e o nó recetor após receber o sinal dos dois pulsos mede o TOF pela diferença de tempo de chegada de ambos os pulsos. O método M. Hazas e A. Hopper apresenta-se como uma exceção, uma vez que no modo assíncrono pode calcular a localização do objeto sem recorrer ao canal auxiliar RF. Este sistema determina a localização do objeto utilizando a diferença do tempo de chegada do sinal aos vários nós recetores (TDOA). No entanto, este sistema exige que cada nó (objeto móvel) conheça a posição exata de cada *Beacon* e os intervalos de tempo de transmissão dos *Beacons*. Isto significa que se a topologia da rede de *Beacons* for alterada, as informações de cada nó devem ser atualizadas. Para além disso todos os *Beacons* encontram-se conectados a um PC central, tornando-o num sistema pouco flexível.

Outro sistema de localização apresentado é o sistema de localização de Daniel Albuquerque. Trata-se de um sistema de localização *indoor* distribuído que apenas utiliza ultrassons para determinar a localização dos nós, sem recorrer a um canal auxiliar de RF ou cabos. Outra particularidade deste sistema, é que os nós móveis não precisam de ter nenhuma informação sobre a rede *Beacons* porque têm a capacidade de determinar a sua localização apenas com as informações fornecidas no pulso ultrassónico enviado pela rede de *Beacons*.

O sistema de localização proposto é um sistema *indoor* distribuído baseado exclusivamente em ultrassons para determinar a localização do nó móvel, evitando o uso de um canal auxiliar de RF ou cabos. Baseado no sistema TDOA este sistema calcula a posição do nó com base apenas na diferença dos tempos de chegada. Uma particularidade deste sistema é que os emissores (*speakers*) estão continuamente a emitir um sinal periódico e contínuo no tempo, sem sincronismo temporal. O que significa que a rede de *speakers* e o nó móvel são independentes e com a possibilidade de uma quantidade de utilizadores independentes elevada [27].

3. Descrição do Sistema

Para a descrição do sistema optou-se por separar a emissão da gravação. Apesar de neste trabalho ter sido tudo feito no mesmo sistema, a mais-valia do mesmo é ser feito em estruturas separadas. Na Figura 3-1, está representado os vários passos e técnicas utilizadas para a emissão do sinal.

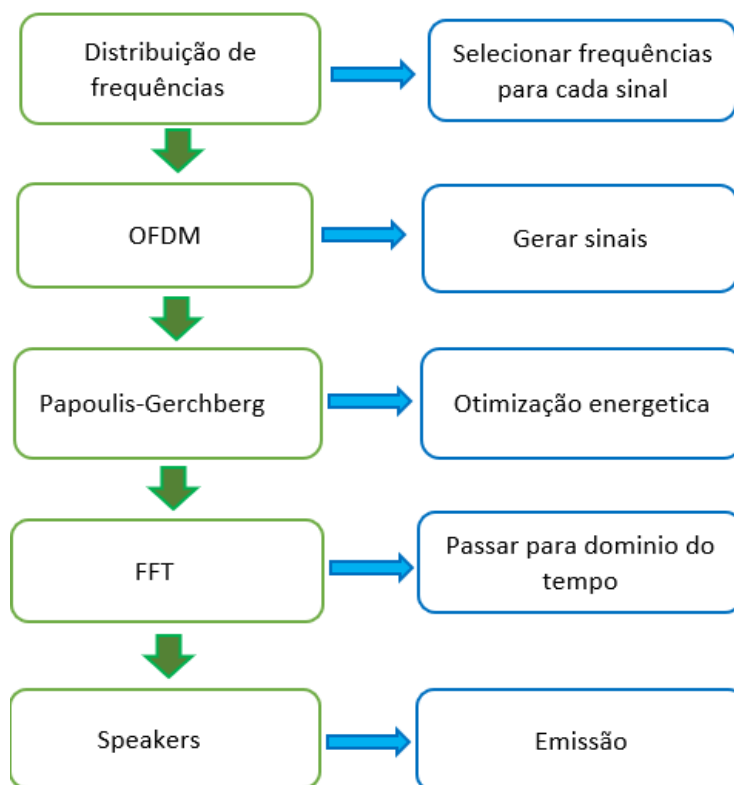


Figura 3-1: Diagrama de emissão e métodos propostos.

O sistema proposto começa por gerar sinais em OFDM dentro da faixa de frequências de 10 a 30 kHz, com blocos de 192000 amostras, equivalentes a 1 segundo. Para isso foi necessário arranjar as frequências que são utilizadas em cada portadora, assim como a fase de cada uma através do método de Newman [27]. Após o sinal criado foi otimizado o PAPR através do método de Papoulis-Gerchberg [27]. Por fim é feita a transformada de Fourier, para passar o sinal para o domínio do tempo e ficar pronto a ser emitido.

A parte de gravação e obtenção de coordenadas está demonstrada sob a forma de diagrama na Figura 3-2. Como o sistema é processado no mesmo computador, a emissão e gravação ocorre em simultâneo e com a mesma duração. No entanto para simular um sistema independente, apenas foi selecionado uma parte aleatória do sinal com o tamanho de um período do sinal.

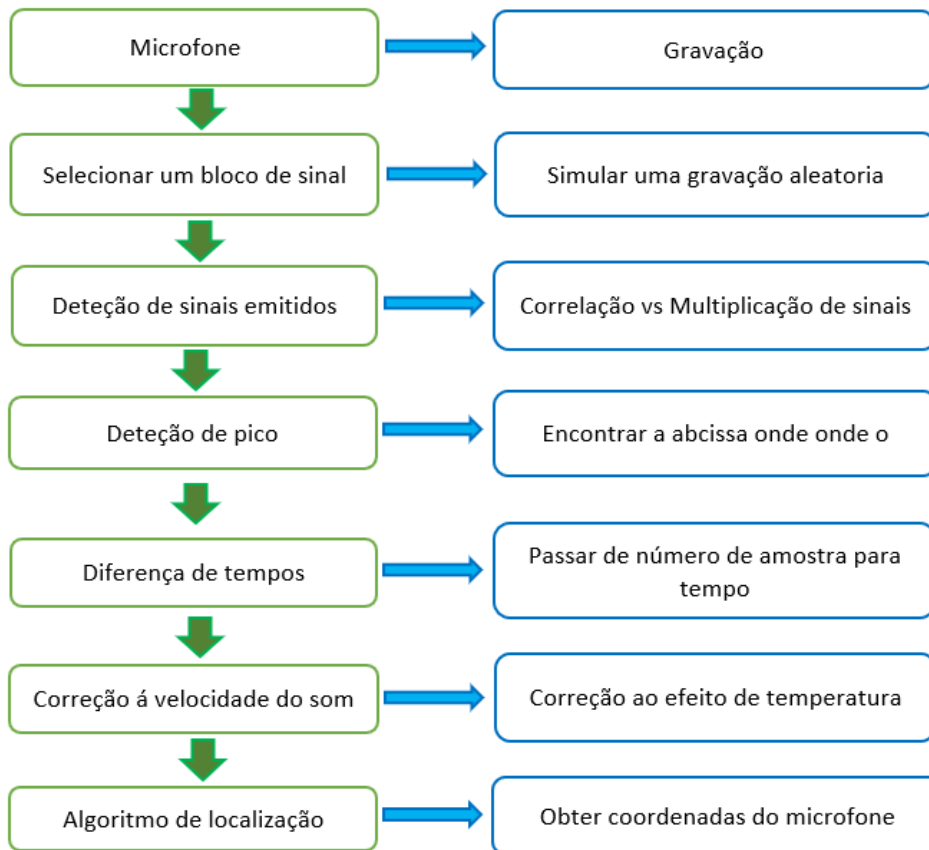


Figura 3-2: Diagrama de gravação e tratamento do sinal.

Para filtrar os sinais emitidos dentro do sinal gravado vão ser utilizadas duas técnicas para determinar qual a mais eficiente no tempo de execução. Uma passa por utilizar a correlação do *software* e outra a correlação no domínio de frequências. Para detetar o número da amostra em que o pico ocorre, foram utilizadas ferramentas do Matlab que devolvem a ordenada e a abcissa do pico. Para passar o valor da amostra para o valor temporal, basta dividir pela frequência de amostragem utilizada, de 192000 amostras por segundo. Após calcular a diferença de tempos de ocorrência dos picos e calcular a correção da velocidade do som para a temperatura do espaço, foi possível utilizar o algoritmo baseado no TDOA, para a obtenção das coordenadas. Este método revela todo o interesse para sistemas de localização sem fios, por não necessitar de sincronismo, o que torna o sistema de localização mais simples e robusto .

3.1 OFDM

Para a implementação do sistema optou-se por criar um sinal periódico e contínuo no tempo e sem sincronismo temporal, para que fosse possível ter uma quantidade ilimitada de utilizadores, criando assim uma independência entre a estrutura de localização e o objeto a ser localizado. Para se localizar é apenas necessária uma amostra de sinal, que deve ser assimilada de forma contínua e com o mínimo de um período do sinal. Para a criação do sinal optou-se por utilizar

a técnica de OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ou multiplexação por divisão de frequências [29].

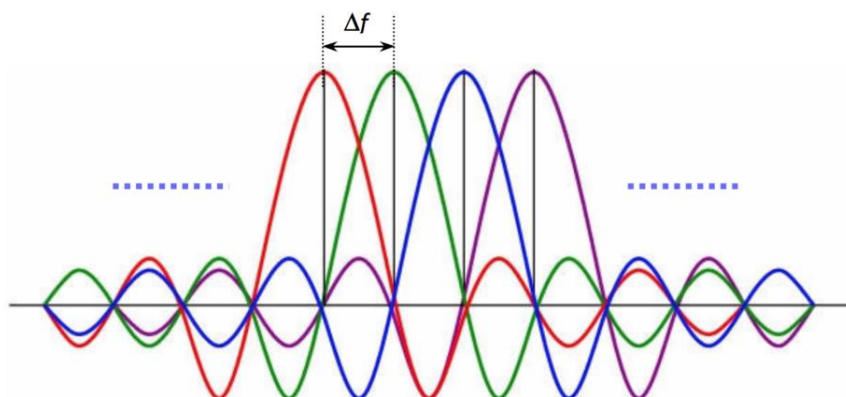


Figura 3-3: Seleção de frequência das subportadoras [29].

Esta técnica permite a transmissão de dados através de múltiplas portadoras com frequências diferentes e com uma taxa de transmissão baixa. Derivada do FDM (Frequency Division Multiplexing), o OFDM tira maior partido da banda de frequências, por não necessitar de banda de guarda entre portadoras [30].

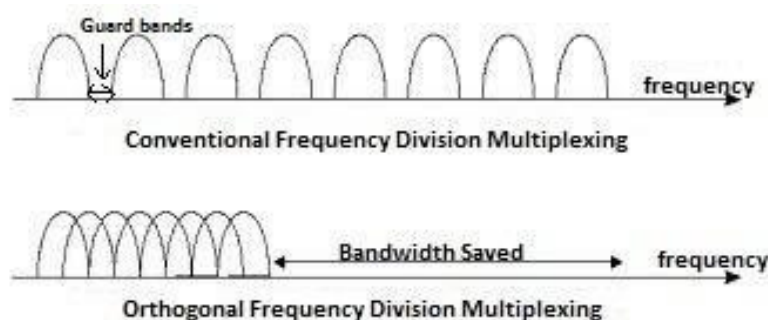


Figura 3-4: Multiplexação por Divisão de Frequência Convencional e Multiplexação de Divisão de Frequência Ortogonal [31].

Para além de terem frequências diferentes a onda portadora tem a particularidade de se anular quando o pico de outra uma portadora ocorre, nunca havendo interferências entre elas, daí a ortogonalidade [29]. Para evitar a interferência entre vários sinais de ultrassons, o sistema deve ser operado de forma que garanta a ortogonalidade entre os sinais. Geralmente, ortogonalidade significa que para duas funções, x e y , o produto interno deve ser igual a zero, como é apresentado na equação (3-1).

$$(x, y) = 0 \tag{3-1}$$

Uma vez que a localização é baseada na medição de deslocamentos de tempo entre um sinal transmitido e recebido, a equação (3-1) deve ser verdadeira para todas as combinações possíveis de deslocamentos de tempo. Satisfazer esta condição significa que os dois sinais não estão

correlacionados e não interferirão um com o outro. Isso permite acesso múltiplo do canal de ultrassons, onde um sistema pode operar vários transmissores dentro de uma largura de banda limitada [13].

O sinal é transmitido numa banda de frequências e o resultado tem maior robustez aos problemas mais comuns da transmissão sem fios, tais como, a interferência por *multipath*, ruído provocado por ambientes adversos, atenuação de altas frequências e interferência de inter-símbolo. O OFDM é muito utilizado para a transmissão de dados em várias tecnologias de comunicação e também em muitas aplicações de localização em modelos diferentes ao que está aqui a ser apresentado quer em ondas de ultrassons quer em ondas eletromagnéticas [29]. A opção de utilizar o OFDM foi também de encontro à necessidade de ter um sinal contínuo e não pulsado como na generalidade dos sistemas de localização. Foi utilizada uma banda compreendida na faixa dos 10 a 30 kHz, com subportadoras implantadas de 1 em 1 Hz. Sendo o nosso sistema composto por 4 *speakers*, também serão criadas 4 portadoras distintas, uma para cada speaker. Cada portadora é descrita com uma dada amplitude e fase inicial. É assumido que a amplitude é igual para todas as portadoras, sendo 0 para as portadoras fora da banda e 1 para as portadoras dentro da banda. Sendo a fase o único parâmetro a dimensionar, a expressão para o sinal OFDM é dada por:

$$X(\theta) = \cos(\theta) + \sin(\theta) = e^{\theta i} \quad (3-2)$$

3.1.1 Escolha de fase do sinal OFDM

Quando é gerado o sinal OFDM, uns dos inconvenientes é a variação da amplitude e o aparecimento de picos de valores muito acima da média. Para efeitos de teste não seria um problema, mas pensando numa aplicação industrial, quanto menor for a variação de amplitude maior será a eficiência na transmissão do sinal, tirando maior partido da potência dos amplificadores. Para descrever este efeito foi utilizado o PAPR, que se traduz na relação entre o valor de pico e o valor médio da potência do sinal. Para cálculo da fase inicial foi utilizado o método Newman por ser de fácil aplicação e ser um método que produz um valor de PAPR relativamente baixo. A fase inicial é definida pela equação (3-3):

$$\theta(k) = \frac{(k - 1)^2}{N_c} \pi \quad (3-3)$$

A fase inicial vai ser então dada em ordem às frequências que foram aleatoriamente escolhidas, 5000 frequências para cada sinal OFDM dentro do espectro de 10 a 30 kHz. A utilização de frequências de forma aleatória e não sequencial foi propositada, por forma a evitar a repetição constante do sinal dentro do mesmo período. Isso foi constatado durante os primeiros testes, quando se arranhou as frequências de forma sequencial. Os primeiros resultados obtidos do sinal, revelaram muita dispersão nas amplitudes como se pode ver na Figura 3-5. O PAPR

calculado a partir do Matlab foi aproximadamente de 30, o que é um valor bastante elevado tendo em conta que o ideal seria um PAPR de 1, em que o valor da potência de pico seria igual ao valor médio da potência.

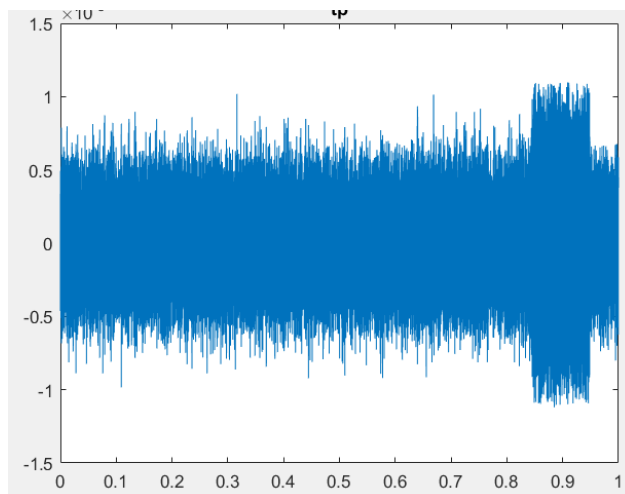


Figura 3-5: Resultado do sinal OFDM gerado.

Para corrigir o problema, é necessário eliminar os picos e convergir os valores, por forma a ter uma distribuição, o mais linear possível. Para tal foi usado um algoritmo baseado no algoritmo de Papoulis-Gerchberg [27] como se pode ver na Figura 3-6.

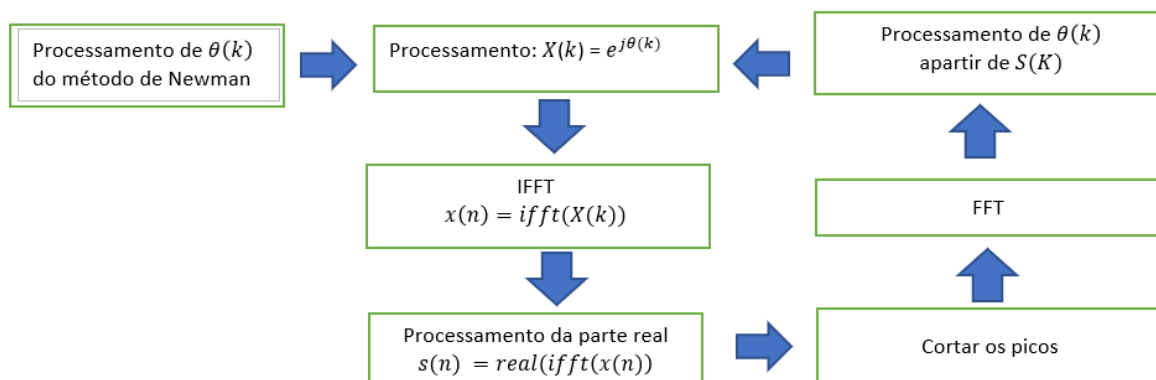


Figura 3-6: Diagrama ilustrativo do algoritmo de Papoulis-Gerchberg

O algoritmo passa o sinal gerado pelo método de Newman para o domínio do tempo através da IFFT e processa apenas a parte real das ondas portadoras. De seguida é cortado o sinal para valores superiores e inferiores a 90% do valor máximo e mínimo de amplitude respetivamente. De notar que não se deve cortar mais do que 75% do sinal sob pena deste não convergir. Se se utilizar valores acima de 90% é mais seguro, mas vai prolongar mais o processo de iteração. O sinal é de novo passado para o domínio da frequência, são processadas as novas fases das ondas portadoras, agora com os novos valores de fase e mantendo os valores de frequência. Este

processo é repetido até que se tenha um valor de PAPR aceitável. Na Figura 3-7 podemos ver a alteração dos valores de PAPR em função do número de iterações feitas.

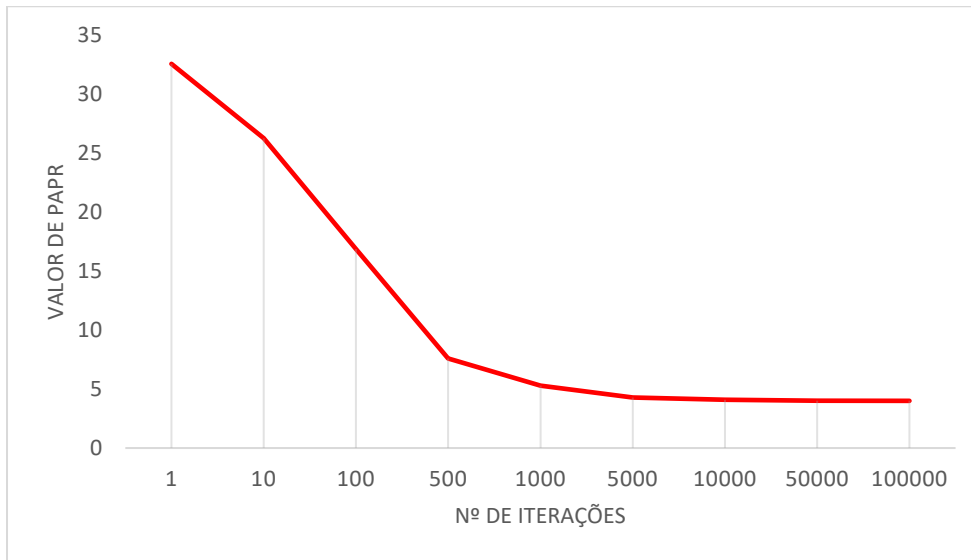


Figura 3-7: Resultado obtido dos valores PAPR em ordem ao número de iterações.

O primeiro resultado a salientar no gráfico da Figura 3-7, é que é possível fazer baixar drasticamente o valor PAPR posteriormente à criação do sinal. Um segundo aspeto é que se torna cada vez mais difícil baixar esse valor quando nos aproximamos de valores próximos de 4. De facto, o algoritmo converge para valores próximos de 4. Em trabalhos futuros é também possível explorar melhor estes valores com outras técnicas conhecidas. No gráfico da Figura 3-8, da Figura 3-9 e da Figura 3-10 pode-se verificar a evolução do sinal à medida que se itera o sistema, com 500 iterações com um PAPR de 7,6 , 10000 iterações com um PAPR próximo de 4 e 100000 iterações com um PAPR próximo de 3,8.

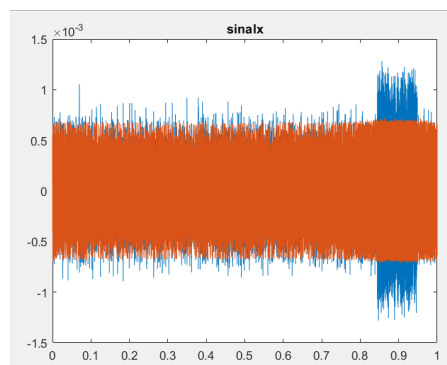


Figura 3-8: Sinal otimizado com 500 iterações, a azul o sinal original e a laranja o sinal otimizado.

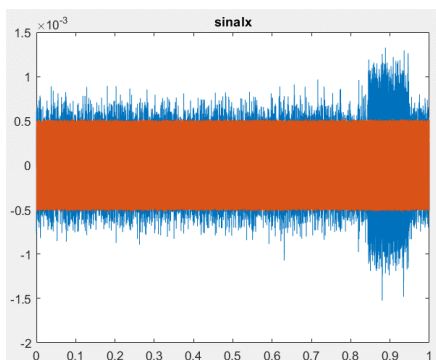


Figura 3-9: Sinal otimizado com 10000 iterações, a azul o sinal original e a laranja o sinal otimizado.

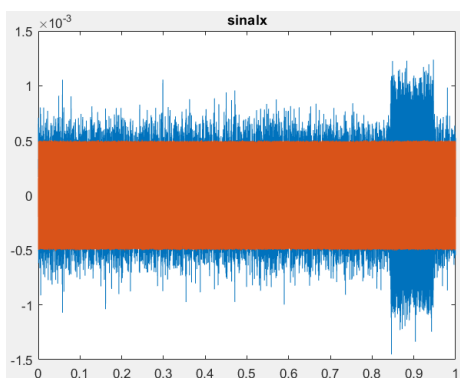


Figura 3-10: Sinal otimizado com 100000 iterações, a azul o sinal original e a laranja o sinal otimizado.

3.1.2 Detecção dos Sinais Emitidos

Após ter o sinal otimizado, é então necessário passar o sinal para o domínio temporal para ser emitido. Para passar o sinal para o domínio do tempo terá de se aplicar a transformada inversa de Fourier (recorrendo ao IFFT), A partir daqui o nosso sinal fica pronto a ser reproduzido. Como dito anteriormente, o sinal criado tem a duração de um segundo, basta então na reprodução fazer a adição dos blocos em série e o sinal ficará contínuo e com periodicidade de um segundo.

Durante a emissão do sinal, deverá ser realizada a gravação do mesmo com uma duração igual ou superior à duração de um bloco de sinal correspondente a um período. Esta gravação pode ser feita de forma aleatória, desde que tenha a duração mínima de um segundo. De seguida, é necessário passar o sinal novamente para o domínio das frequências com recurso ao FFT. De notar que as transformadas de Fourier resultam para as OFDM como um modelador e desmodulador de sinal. Sendo que, para tratar o sinal são usadas as frequências e para emissão e gravação basta passar o sinal para o domínio temporal.

Por fim é necessário determinar o desfasamento temporal entre os quatro sinais. Para isso cada um dos 4 sinais gerados, que foi emitido em cada um dos *speakers*, é comparado com uma

versão do sinal emitido. Inicialmente foi usado uma ferramenta do Matlab que permite diretamente encontrar o sinal pretendido dentro do sinal gravado. O *software* devolve a correlação cruzada de duas sequências discretas no tempo [32], contudo, a correlação cruzada necessita de uma amostra de sinal superior à duração de um bloco. Isto porque não havendo sincronismo não é possível saber se está perante o início ou fim do bloco, não sendo possível ao *software* fazer a correlação. Para contornar o problema o ideal será sempre usar uma amostra com a duração de 2 blocos. No entanto é também possível tirar partido da ortogonalidade do sinal gerado, isto é, se fizermos o produto do conjugado de cada um dos sinais OFDM gerados, pelo sinal gravado. O resultado será o sinal multiplicado pelo conjugado do próprio sinal, isto permite o alinhamento de fases e um subsequente impulso no domínio do tempo. Este método permite a utilização de apenas um bloco, ou período de sinal. Como já foi visto, no princípio do OFDM, quando ocorre o pico de um sinal os restantes são nulos. Na Figura 3-11 é apresentado um esquema que demonstra o processo da determinação do desfasamento temporal entre os sinais emitidos desde a gravação do sinal sonoro até à individualização dos sinais pretendidos através da multiplicação de sinais.

Para fazer correlação do Matlab é necessário ter um período de sinal completo dentro da janela de observação, enquanto que para o processo de multiplicação de sinais apenas no domínio da frequência será apenas necessária uma janela de observação igual ao período do sinal. Em comparação, a correlação do Matlab demora perto de 0,0055 segundos a aplicar o filtro para cada sinal, para o sistema em estudo. Enquanto que aplicando o produto apresenta uma duração de apenas 0,0021 segundos. É uma diferença ainda significativa de 0,0034 segundos por sinal, que resulta numa diferença de 0,0136 segundos no total, e por isso optou-se pelo método de multiplicação de sinais.

Esta é uma questão importante, se imaginarmos um AMR a tentar localizar-se enquanto se desloca a uma velocidade de 2 m/s, o equivalente a um humano em passo acelerado. Então 0,0136 segundos pode significar um deslocamento incerto de 2,72 cm. Pode ainda piorar o cenário se for utilizado mais do que 4 *Beacons*, o tempo de processamento iria aumentar. O mesmo se for aumentada a velocidade do robô.

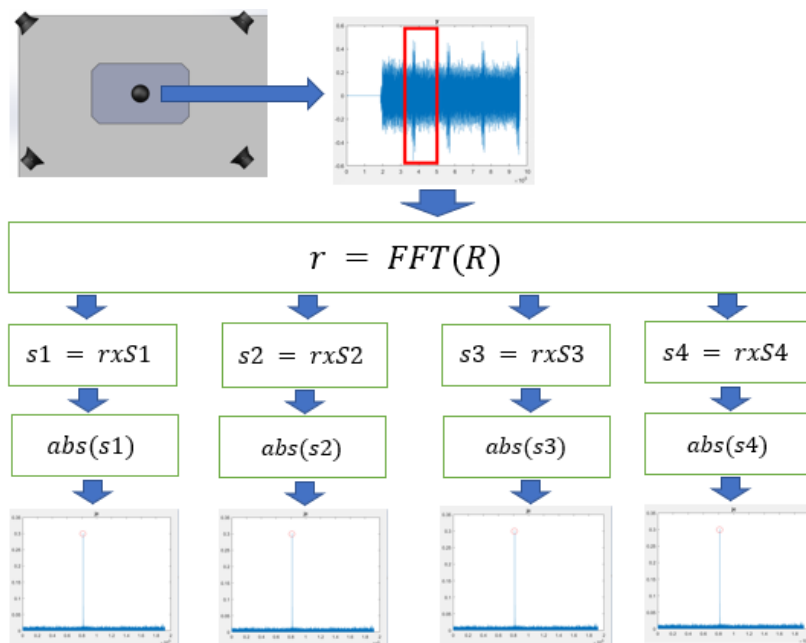


Figura 3-11: Esquema de recepção do sinal até à aplicação do produto de sinais.

Na Figura 3-11 é possível ver um diagrama do processo de individualização de sinais a partir do método de correlação no domínio da frequência. Após se ter gravado e selecionado o sinal, é logo possível passar o sinal selecionado para o domínio da frequência, através das transformadas de Fourier. É agora necessário ir buscar os sinais que foram emitidos, fazer o conjugado e multiplicar pelo sinal gravado no domínio da frequência. O valor a retirar é o valor da abcissa em que o primeiro pico ocorre. É feito um absoluto aos valores do gráfico, para que os valores apareçam todos na parte positiva. Para tirar o valor da abcissa do primeiro pico é utilizada uma função do Matlab, que devolve o valor da abcissa em número de amostra. Para passar o valor de amostra para tempo, basta dividir pela frequência de amostragem utilizada que no caso é de 192000 amostras por segundo. Para o algoritmo não vai interessar o valor dos tempos, mas sim a diferença entre eles. Os valores dos tempos de chegada só teriam significado caso fosse possível saber os tempos em que foram emitidos. Nesse caso seria necessário um sistema adicional, ou em Ultrassons ou RF para sincronizar os relógios do sistema de emissão e de recepção, e poderíamos também recorrer a outros métodos de localização tais como o TOA ou TOF.

3.2 TDOA

Baseado no método TDOA, o sistema implementado está pensado para obter apenas a diferença entre tempos de chegada. Com isto a estrutura de localização formada por 4 *speakers* vai estar continuamente a emitir e o robô a localizar-se usando apenas um microfone.

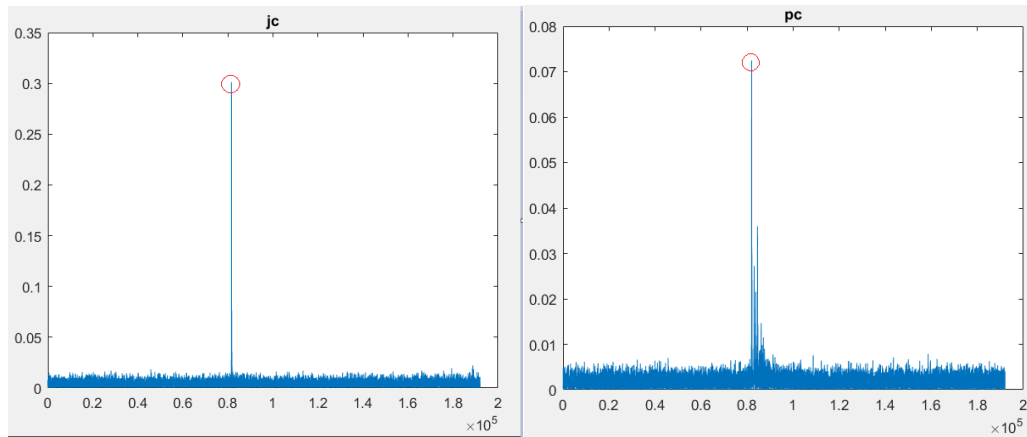


Figura 3-12: Exemplo de sinais já filtrado após recepção em Matlab

Na Figura 3-12 vemos a comparação de 2 dos 4 sinais que compõem o sistema. O que interessa retirar deste gráfico é a altura em que o primeiro pico acontece. Nem sempre o primeiro pico é o de maior intensidade ou o de transmissão direta. Por vezes, o primeiro pico é menos intenso que o próprio eco. Dependendo muitas vezes da posição e orientação do *speaker* em relação ao microfone do objeto móvel.

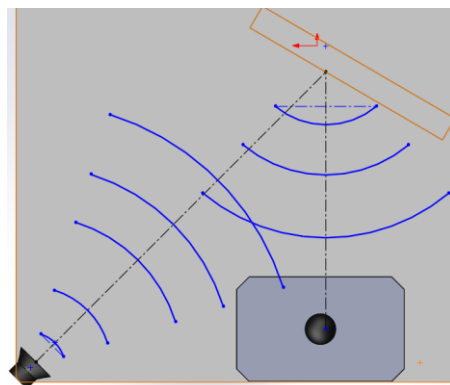


Figura 3-13: Exemplo de eco do sinal

Como se pode ver na Figura 3-13, quando o AMR se desloca em posições adversas, a propagação do som, pode acontecer por forma a que a comunicação mais direta, que é a que interessa seja de pouca intensidade. Para isso é necessário não recolher o pico de maior intensidade, mas sim o primeiro pico. No entanto é necessário diferenciar o que é o pico de transmissão do ruído de fundo. É, portanto, necessário definir um limiar seguro para qual diferenciamos a comunicação pretendida do ruído.

Para o sinal j representado na imagem da esquerda da Figura 3-12, é possível verificar que o pico ocorre para a amostra número 81559, enquanto para o sinal representado na imagem da direita da Figura 3-12, o primeiro pico ocorre na amostra número 81940. O intervalo do gráfico é 192000 amostras, que foi a frequência de amostragem definida para o gravador, de 192000 amostras por segundo. Para já é possível destacar que o sinal j ocorre primeiro que o sinal p . A diferença temporal pode ser calculada da seguinte forma:

$$\Delta t = \frac{(ap - aj)}{\text{Frequência de amostragem}} \Leftrightarrow \quad (3-4)$$

$$\Leftrightarrow \Delta t = \frac{(81940 - 81559)}{192000} \Leftrightarrow$$

$$\Delta t = 0,00198 \text{ segundos}$$

Se ao valor da diferença de tempos calculado em (3-4) for multiplicado a velocidade de propagação do som, obtém-se então a diferença de distâncias que o *speaker* que transmitiu o sinal j , se encontra do microfone em relação à distância que o *speaker* que transmitiu o sinal p , se encontra do microfone. Para já é possível concluir que o *speaker* j está mais perto do microfone que o *speaker* p , essa diferença pode ser dada por [27]:

$$\theta_{\Delta d} = \Delta t \times v_{som} \quad (3-5)$$

Em que v_{som} é a velocidade de propagação do som que vamos assumir de 343m/s, para uma temperatura de 20° Celsius [27].

$$\Delta d = 0,00198 \times 343 \Leftrightarrow \Delta d = 0,679 \text{ m} \quad (3-6)$$

Para obtenção das coordenadas foi implementado um algoritmo já conhecido baseado no TDOA, em que a diferença de distâncias entre os diferentes *speakers* pode ser dada por [27]:

$$C_c = C_a + C_1 \quad (3-7)$$

Onde C_a é dado por (3-8) e C_1 pelas coordenadas do *speaker* 1.

$$C_a = (CC^T)^{-1}C(r - d_1\Delta) \quad (3-8)$$

Onde

$$C = [C_2 \quad C_3 \quad \dots \quad C_3]; \quad r = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \|C_2\|^2 - \Delta_2^2 \\ \|C_3\|^2 - \Delta_3^2 \\ \vdots \\ \|C_3\|^2 - \Delta_L^2 \end{bmatrix}; \quad \Delta = \begin{bmatrix} \Delta_2 \\ \Delta_3 \\ \vdots \\ \Delta_L \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

Na equação (3-9), C é a matriz de coordenadas e Δ a diferença de distâncias ao nó 1. Onde d_1 pode ser também representado pela equação (3-10).

$$d_1^2 = x_a^2 + y_a^2 + z_a^2 \quad (3-10)$$

Em que x_a , y_a e z_a são as coordenadas do microfone.

4. Implementação de Sistema de Localização por Ultrassons

Neste capítulo é demonstrado com detalhe como foi desenvolvido o trabalho prático de desenvolvimento do sistema de ultrassons. Começando por fazer uma breve descrição de todo o trabalho prático desenvolvido, passando por mostrar o hardware utilizado e finalizando com a demonstração mais esquemática da programação em Matlab.

4.1 Descrição do ensaio

Dado a situação que o país atravessa, fruto da atual pandemia Covid-19, a realização dos ensaios foi fortemente condicionada. Pelo que não foi possível explorar e testar o sistema em meio industrial. O primeiro passo passou pela implementação de um protótipo simples e funcional de um sistema de localização com ultrassons usando componentes comerciais e um PC. Para tal foi necessário escolher a fonte de alimentação, amplificadores, placa de som, microfone e *speakers*. A Figura 3-15 apresenta o sistema implementado nas condições reais de teste.

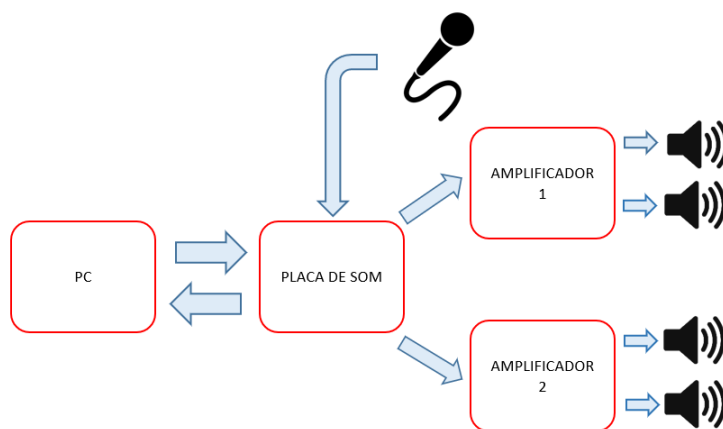


Figura 3-14: Estrutura do *hardware* implementado.



Figura 3-15: Foto parcial do sistema implementado, é possível ver os amplificadores, 2 dos *speakers*, placa de som e microfone.

O fluxo de informação está representado na Figura 3-14. Em resumo, o PC envia o sinal para os *speakers* por intermédio da placa de som e dos amplificadores, e recebe o sinal da gravação do microfone por intermédio da placa de som. Após a escolha, teste e ligação de todo o *hardware*, foi iniciada a programação em Matlab. Começando por testar o sistema de reprodução e gravação com sinais mais simples (ruído branco) sem fazer recurso aos sinais de OFDM. Com o sistema de reprodução e gravação a funcionar, foi usada a correlação cruzada para encontrar a correspondência do sinal na gravação no domínio temporal. A partir daqui já foi possível testar o sistema de medição e ver as diferenças de tempos de propagação do sinal e comparar com as distâncias entre *speakers*. Com a aquisição de distâncias a funcionar, foi possível testar o algoritmo de multilateração. Por fim foram criados os sinais em OFDM, ajustadas as distribuições de frequências para cada sinal, mantendo o filtro de correlação. Mais tarde foi substituído o processo de correlação pela correlação no domínio da frequência, que é no fundo o produto do sinal gravado pelo conjugado dos sinais emitidos do domínio da frequência em cada um dos *speakers*.

4.2 Resolução do Sistema

Como vimos, a banda de frequências utilizada é de 10 a 30 kHz. Então a frequência de amostragem tem de ser sempre no mínimo duas vezes superior á frequência máxima do sistema. Uma vez que a placa de som suporta 96 kHz e 192 kHz e não existe limitação de memória por estar a ser utilizado um computador para o processamento, foi escolhida a frequência de 192 kHz para a frequência de amostragem por oferecer uma maior resolução do sistema.

A resolução utilizada pode ser calculada a partir do mínimo valor de leitura temporal, que para uma taxa de amostragem de 192000 amostras por segundo é de:

$$t_{min} = \frac{1}{192000} (s) = 5,2 \times 10^{-6} s \quad (3-11)$$

Se se considerara uma temperatura de 20°C, durante a realização dos ensaios, obtém-se uma resolução global do sistema de:

$$\text{Resolução} = 5,2 \times 10^{-6} \times 343 \approx 0,0018 \text{ m} \quad (3-12)$$

Em que 343 m/s na equação (3-12) é a velocidade aproximada de propagação do som para a temperatura de 20°C e $5,2 \times 10^{-6}$ segundos, o menor valor medido pelo sistema implementado calculado em (3-11). O que nos dá uma resolução de 0,0018 metros.

4.3 Hardware Utilizado

Para a programação foi utilizado o programa Matlab por ser um programa disponibilizado pela Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, com elevada versatilidade e com um ambiente de programação já conhecido e estudado em unidades curriculares referentes a este curso de Mestrado. O equipamento de emissão e gravação foi grande parte dispensado pela escola no qual se destaca:

- 1x Placa de som;
- 1x Fonte de alimentação;
- 2x Amplificadores;
- 4x Speakers;
- 1x Microfone;
- PC.

4.3.1 Placa de Som ASUS XONAR U7

A placa de som utilizada é uma placa comum de uso doméstico que constitui a interface entre o PC e o sistema de áudio. O PC com recurso ao software Matlab, onde está implementado o algoritmo de localização, comunica com o equipamento Asus Xonar U7, Figura 3-16, para o envio, receção e processamento dos sinais de ultrassons. Para o sistema em estudo apenas foram necessárias duas saídas stereo e uma entrada de microfone. Algumas das características mais relevantes da placa são apresentadas no Quadro 3-1.



Figura 3-16: Placa de Som ASUS XONAR U7.

Quadro 3-1: Características da placa de som ASUS XONAR U7.

Interface	USB
Qualidade Áudio	24 bit
Canais de Áudio Suportados	7.1
I/O	4x Saídas Áudio Jack 3.5mm (Headphone out /Front out/Center Subwoofer out/Rear out) 2x Saídas RCA 1x Saída Áudio Digital Ótico Coaxial (S/PDIF) 1x Entrada Jack 3.5mm (Line-In/Mic combo)
Frequência de Resposta	10Hz – 46 kHz
Conversor (ADC) Áudio A/D	24-bit/192 kHz
Conversão Digital-para-Analógico	24-bit/192 kHz
Line-out Total Harmonic Distortion (THD)	0,0006%
Line-in Signal-to-Noise Ratio (SNR)	110dB
Line-out Signal-to-Noise Ratio (SNR)	114dB
Relação Sinal-Ruído	Até 114dB

4.3.2 Amplificador ST TODA 7297

Uma vez que a placa de som não incorpora amplificadores, foram utilizados dois amplificadores externos à placa com 2 saídas, uma saída para cada speaker. O amplificador, Figura 3-17, é alimentado diretamente da fonte alimentação a 12 Volts. Para além do circuito integrado a nossa placa inclui um potenciômetro, um dissipador de calor e uma entrada para cabo Jack 3,5 mm² como mostra a Figura 3-18. No Quadro 4-2 são apresentadas algumas das suas características técnicas do amplificador.



Figura 3-17: Fonte de Alimentação comum AC/DC de 12 V/60 W.

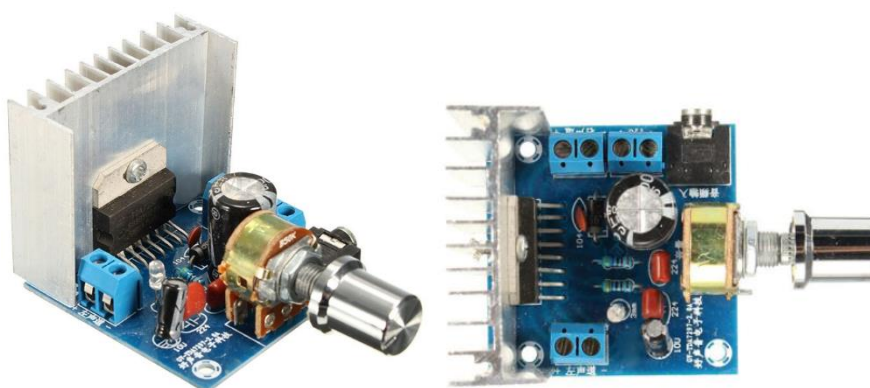


Figura 3-18: Amplificador ST TODA 7297.

Quadro 3-2: Características do Amplificador ST TODA 7297.

Símbolo	Parâmetros	Condições de teste	Min.	Tip.	Max.	Unid.
V_{CC}	Alimentação	-	6.5	-	18	V
I_q	corrente de repouso total	$R_L = \infty$	-	50	65	mA
V_{os}	Desvio na tensão de saída	-	-	-	120	mV
P_o	Potência de saída	THD = 10%	13	15	-	W

4.3.3 Speakers PW5120N

Os *Speakers* utilizados foram os PW5120N, à prova de água que operam numa gama de frequências entre 2,5 kHz e 60 kHz. Para melhorar os testes efetuados foi impresso em 3D um suporte para cada *speaker* em PLA, como é apresentado na Figura 3-19. No Quadro 3-3 são apresentadas algumas das suas características técnicas deste equipamento.



Figura 3-19: Speakers PW5120N.

Quadro 3-3: Características dos Speakers PW5120N.

No.	Item	Unidades	Especificações	Condições
1	Tensão	V_{rms}	Máx. 10	-
2	Tensão nominal	V_{rms}	2.83	-
3	Consumo de corrente	mA	Máx. 30	at 2.83 V_{rms}
4	Capacidade eletrostática	pF	$80.000 \pm 30\%$	at 100 Hz
5	Faixa de frequência de ressonância	kHz	2.5-60	-
6	Frequência de Operação	kHz	20 ± 5	-
7	Níveis de pressão sonora	dB	Min 90	at 2.83 V_{rms} <i>sine wave</i> /30 cm
8	Temperatura de Operação	°C	-20~+60	-

4.3.4 Microfone TRUST Primo

Para a captação de áudio o microfone utilizado foi o microfone de uso comum em computadores de secretária TRUST Primo, Figura 3-20. Algumas das suas características são apresentadas no Quadro 3-4. De salientar que, apesar da frequência máxima anunciada pelo fabricante ser 12 kHz, após alguns testes, verificou-se que este microfone é capaz de adquirir sinal na gama dos ultrassons (> 20 kHz).



Figura 3-20: Microfone TRUST Primo.

Quadro 3-4: Características do Microfone TRUST Primo.

Áudio	Frequência de Resposta	100 Hz – 12000 Hz
	Impedância	2200 Ohm
	Sensibilidade	-45 dB
	Nível de Pressão Sonora	115 dB
Microfone	Sensor Tipo Microfone	Condensador
	Pick-up Pattern	Omnidirecional
	Relação Sinal-Ruído	58 dB

4.4 Programação Matlab

Para melhor percepção e entendimento da programação e funções utilizadas serão usados esquemas de como o algoritmo foi implementado, explicando mais detalhadamente algumas partes de maior relevância. A programação subdivide-se em três partes, obtenção do sinal a emitir por cada *speaker*, emissão e gravação do sinal e algoritmo de localização.

4.4.1 Obtenção do Sinal a Emitir

A primeira parte consistiu na criação do sinal, como já explicado anteriormente, com a utilização do método de Newman para gerar sinais OFDM. Começou-se por selecionar as frequências que seriam utilizadas em cada sinal. Para isso foram utilizadas as frequências entre 10 a 30 kHz, resultando em 20000 frequências disponíveis (para um sinal amostrado a 192 kHz e com duração de 1 segundo). O processo passou por selecionar de forma aleatória 5000 frequências, das 20000 disponíveis, para cada *speaker*. Deste modo foi possível garantir que os sinais gerados serão ortogonais entre si. A Figura 3-21 apresenta um diagrama do processo de escolhas das frequências e criação das fases.

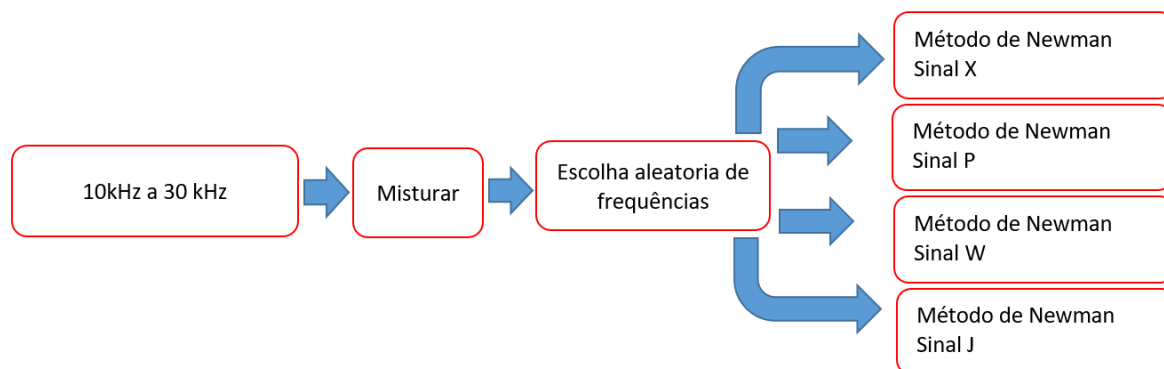


Figura 3-21: Criação do sinal em OFDM, escolha de frequências e criação das fases.

Neste momento o sinal está criado, no entanto para minimizar o PAPR foi rearranjado o sinal por forma a baixar esse valor, recorrendo ao método de Papoulis-Gerchberg que está demonstrado no diagrama da Figura 3-6. Com isto foi possível baixar o valor de PAPR de 32 para 3,8. De seguida foi feita a transformada inversa de Fourier e o sinal fica pronto a ser enviado para a placa de som para ser reproduzido posteriormente nos diversos *speakers*. Cada uns dos 4 sinais gerados vão ser reproduzidos de forma individual em cada um dos *speakers* como mostra o esquema da Figura 3-22.

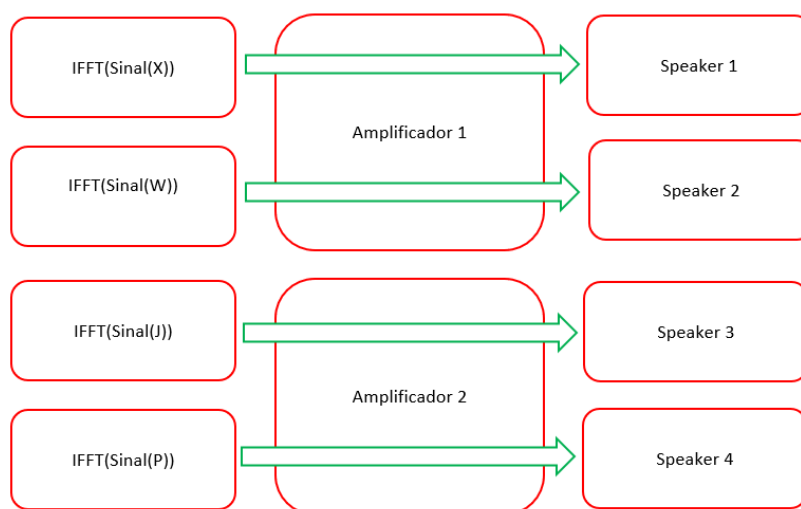


Figura 3-22: Esquema de emissão de sinal.

4.4.2 Emissão e Gravação

A emissão e gravação do sinal recebido ocorreu em simultâneo durante um determinado tempo estipulado. Para a geração de um bloco de sinal a ser emitido, o qual corresponde a um período de sinal, foi usada uma taxa de amostragem de 192000 amostras por segundo que foi a mesma taxa de amostragem usada na gravação do sinal. Para teste realizado foram emitidos apenas 5 blocos de sinal (5 períodos), contudo, é possível emitir blocos de forma sequencial, resultando assim, numa emissão contínua, como se pode ver no esquema da Figura 3-23.

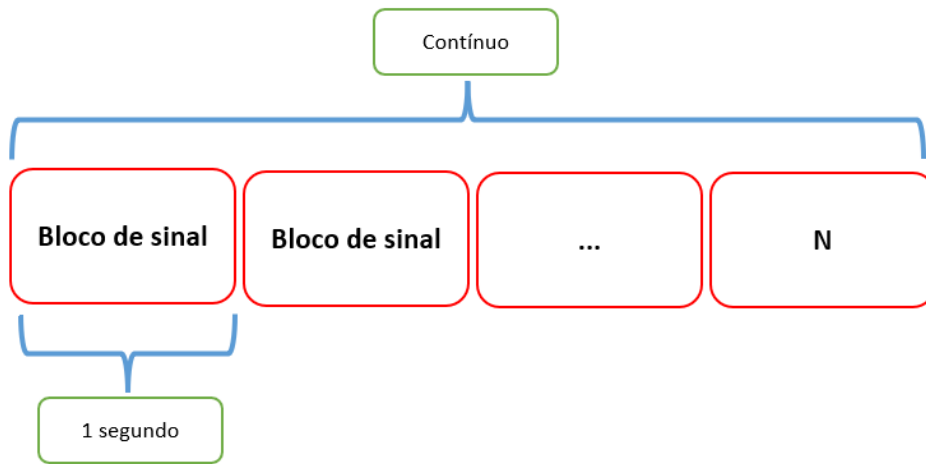


Figura 3-23: Esquema de bloco de emissão.

Apesar do sinal gravado ter a mesma duração do sinal gerado, por limitação do *hardware* utilizado, para simular uma tentativa de localização aleatória no tempo do nosso objeto móvel (microfone), foi usado apenas uma parte aleatória e contínua do sinal, com a dimensão de 192000 amostra para conseguir retirar um período completo. Na Figura 3-24, a imagem da esquerda representa a gravação de 5 blocos consecutivos, ou seja, 5 segundos de duração o que significa 960000 amostras. Na imagem da direita, o retângulo a vermelho representa uma parte aleatória do sinal que vai ser utilizada para localizar o microfone.

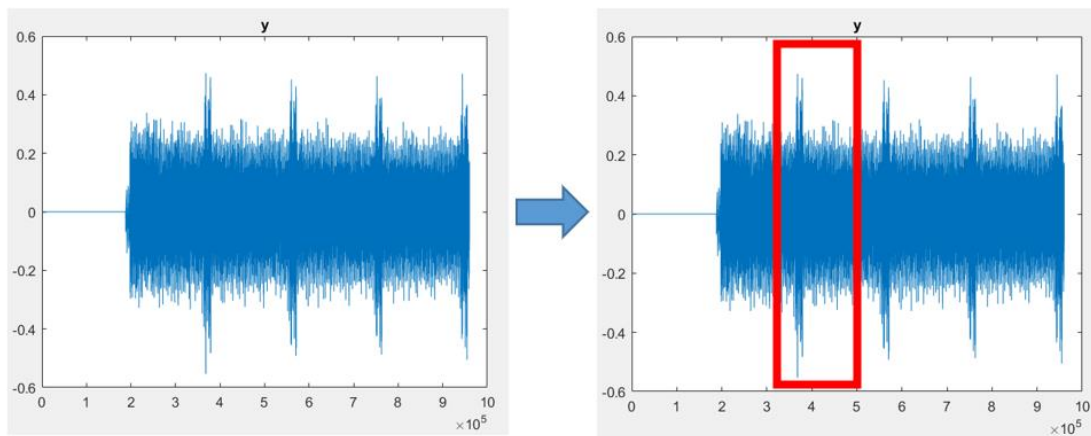


Figura 3-24: Exemplo de seleção aleatória de um bloco de sinal recebido.

Para separar os 4 sinais é necessário, previamente passar o sinal recebido para o domínio da frequência. De seguida será aplicada a correlação do sinal, que, como já foi visto anteriormente, passa por fazer o produto da nossa amostra de gravação pelo conjugado dos sinais criados no domínio da frequência. Adicionalmente, é importante salientar que nesta operação as frequências correspondentes aos restantes speakers serão eliminadas. O sinal resultante é convertido para o domínio do tempo e é obtido o seu valor absoluto (ver exemplo da Figura 3-12). Após a obtenção destes sinais é necessário retirar o instante de tempo do primeiro pico, utilizando as ferramentas *max* e *index* do Matlab. A ferramenta *max* permite saber qual o maior

valor da ordenada do gráfico e o *index* devolve a abscissa desse valor. Por fim e antes de aplicar o algoritmo de localização, são obtidas as diferenças de tempo de chegada em relação ao primeiro *speaker*. Na Figura 3-25 é apresentado um esquema do processo desde a recepção do sinal sonoro até à obtenção de tempos de chegada e que foi descrito em cima.

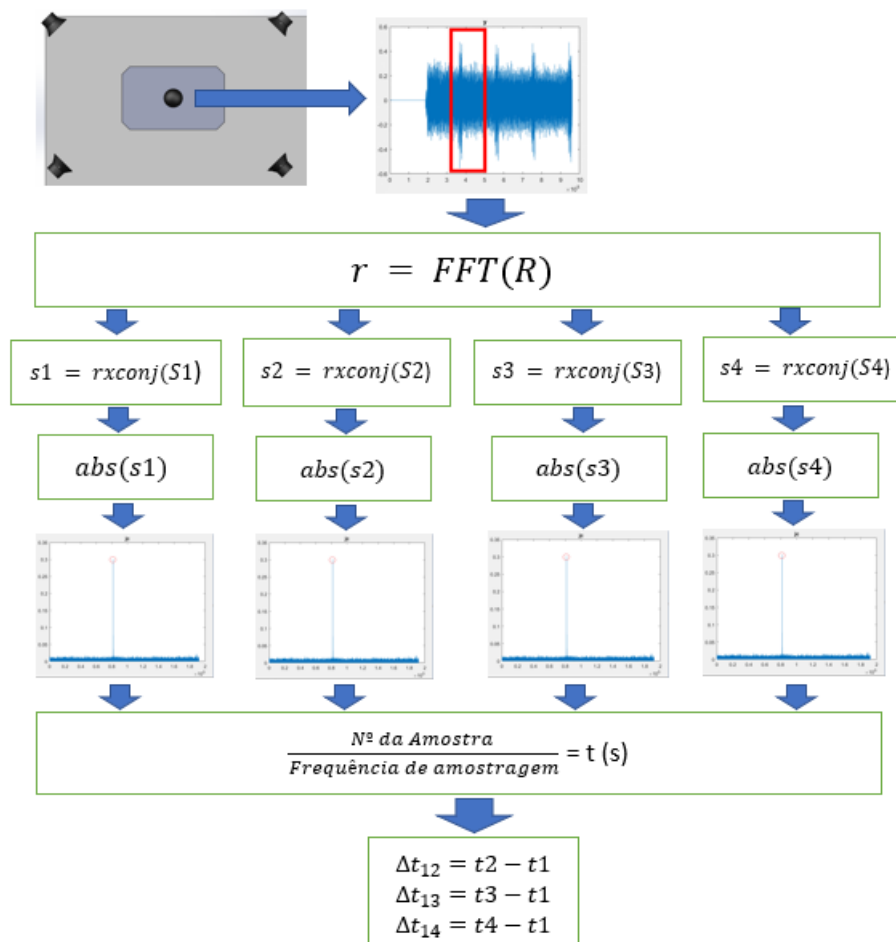


Figura 3-25: Esquema de obtenção de diferença de tempos de chegadas.

4.4.3 Algoritmo de Localização

Para o algoritmo determinar a posição do microfone é necessário fornecer a posição espacial dos diversos *speakers*. Para conhecer a diferença de distâncias dos *speakers* ao microfone é necessário saber o valor de velocidade de propagação do som corrigido pelo menos para o efeito de temperatura, por ser o mais relevante. O valor de velocidade de propagação do som pode ser determinado da seguinte forma:

$$v_{som} = 331,5641 \times \sqrt{\left(\left(\frac{Temp. (^{\circ}C)}{273,15}\right) + 1\right)} \quad (3-13)$$

Na Figura 3-26 é apresentado um diagrama do método de localização, simplificado. O algoritmo de localização baseado no método TDOA está todo descrito no subcapítulo 3.2.

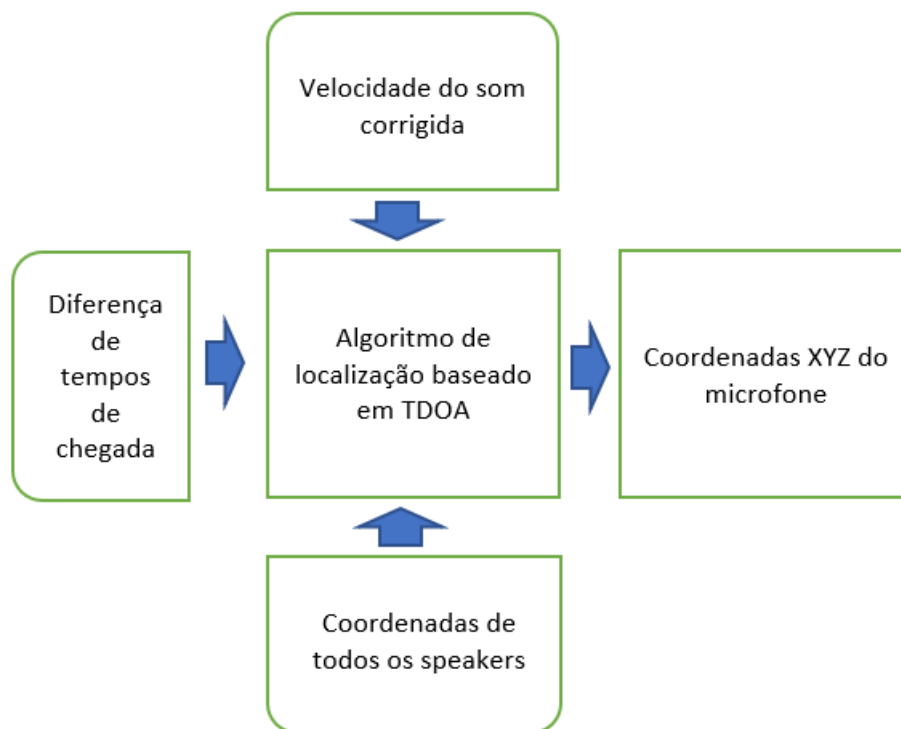


Figura 3-26: Esquema do método de localização implementado.

4.5 Resultados dos Ensaio

Foram realizados dois testes com o microfone a 24,5 cm do chão e um segundo teste com o microfone a 11 cm do chão. Foi utilizada uma grelha de 5 divisões no eixo x e 5 divisões no eixo y . No Quadro 3-5 é dada a coordenada dos 4 *speakers* em centímetros.

Quadro 3-5: Coordenadas dos speakers em centímetros.

	x	y	z
Speaker 1	169,5	191	4,5
Speaker 2	7	7	4,5
Speaker 3	169,5	7	4,5
Speaker 4	1,1	196,9	98

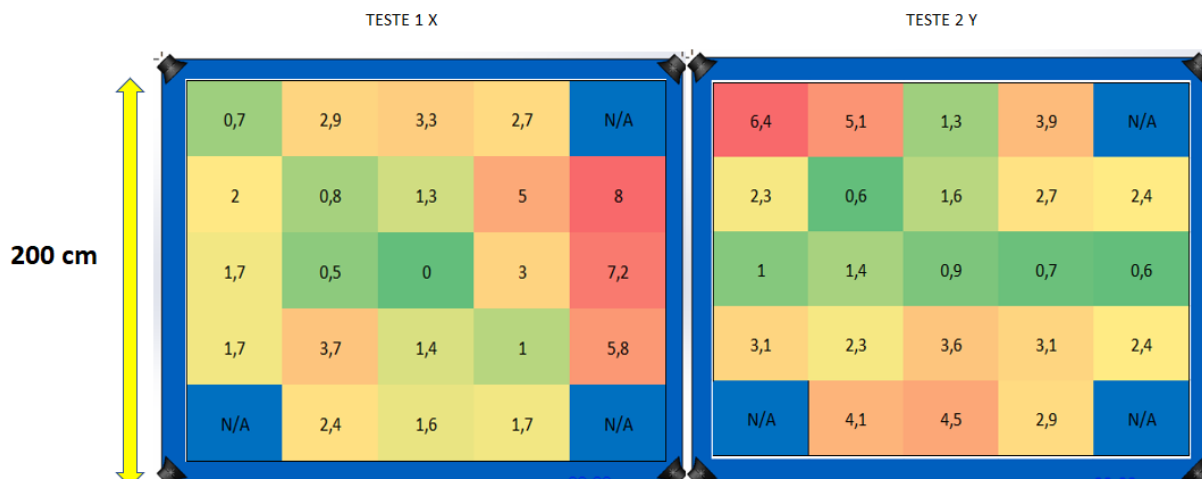


Figura 3-27: Erro da coordenada x na imagem da esquerda e erro da coordenada y na imagem da direita, para o teste a 24,5 cm do chão (valores apresentados em centímetros).

Na Figura 3-27, na imagem da esquerda é possível ver o erro de medição ao longo da grelha de testes. Neste teste o erro máximo na coordenada x foi de 8 cm e o mínimo de 0. A média do erro foi cerca de 3,4 cm. Como é possível verificar nos cantos não foi possível obter valores derivado à proximidade com um dos *speakers*. A energia recebida pelo *speaker* mais próximo é elevada e pode mascarar os restantes. A Figura 3-27, apresenta o resultado para o primeiro teste no eixo y, na imagem da direita. Neste eixo temos um desvio máximo de 6,4 cm e um mínimo de 0,6 cm. A média é de cerca de 2,7 cm.

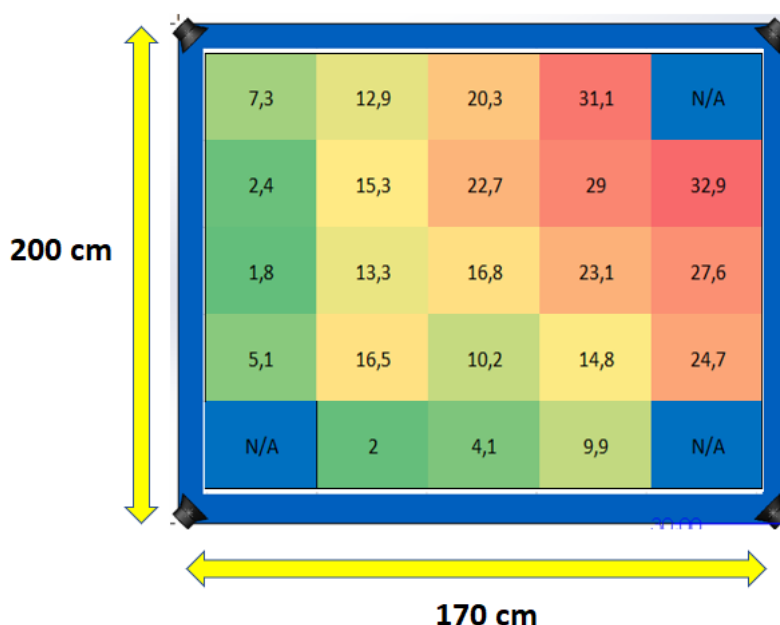


Figura 3-28: Desvio de valores do 1º teste no eixo z em centímetros, para o teste a 24,5 cm do chão (valores apresentados em centímetros).

Neste teste da Figura 3-28 para o eixo z, temos um desvio máximo de 32,9 cm e um mínimo de 1,8 cm. A média é de cerca de 16,3 cm .

4 - Implementação de Sistema de Localização por Ultrassons

No segundo teste o microfone foi posto a uma altura inferior, passando de 24,5 para 11 cm, para tentar perceber se existe alguma alteração significativa nos valores em função da altura do microfone.

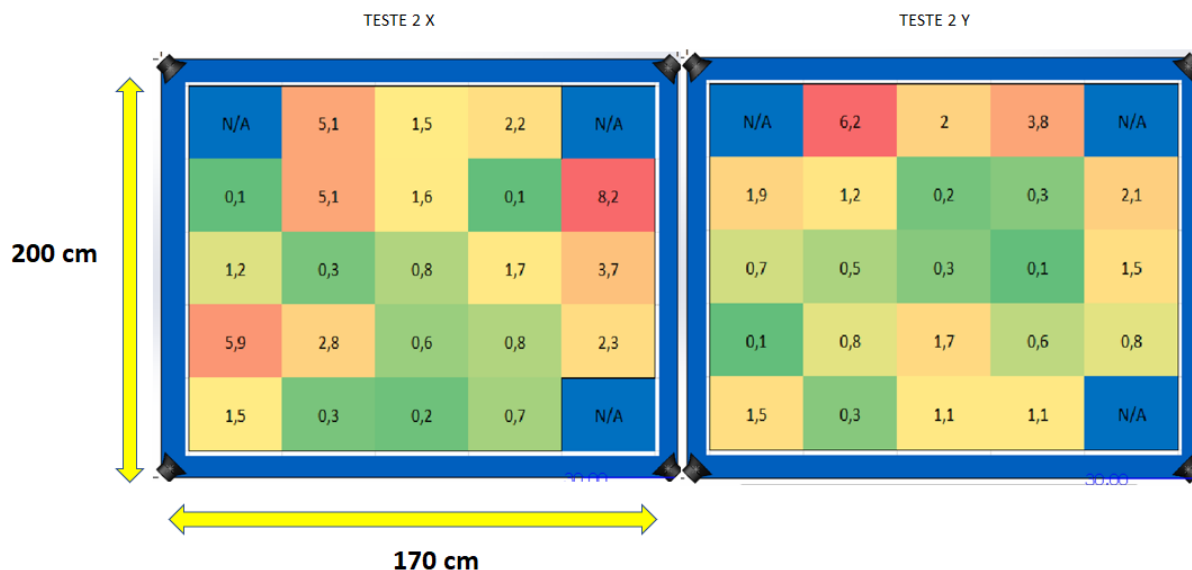


Figura 3-29: Erro da coordenada x na imagem da esquerda e erro da coordenada y na imagem da direita, para o teste a 11 cm do chão (valores apresentados em centímetros).

Neste teste da Figura 3-29 temos um desvio máximo de 8,2 cm e um mínimo de 0,1 cm para o eixo x. A média é de cerca de 2,12 cm. Vemos então um decréscimo no valor médio dos desvios, no entanto, o valor máximo e mínimo é superior quando comparado com o primeiro teste. Neste teste da Figura 3-29, na imagem da direita, temos um desvio máximo de 6,2 cm e um mínimo de 0,1 cm. A média é de cerca de 1,3 cm. Neste eixo é possível ver melhorias tanto nos limites como na média dos valores.

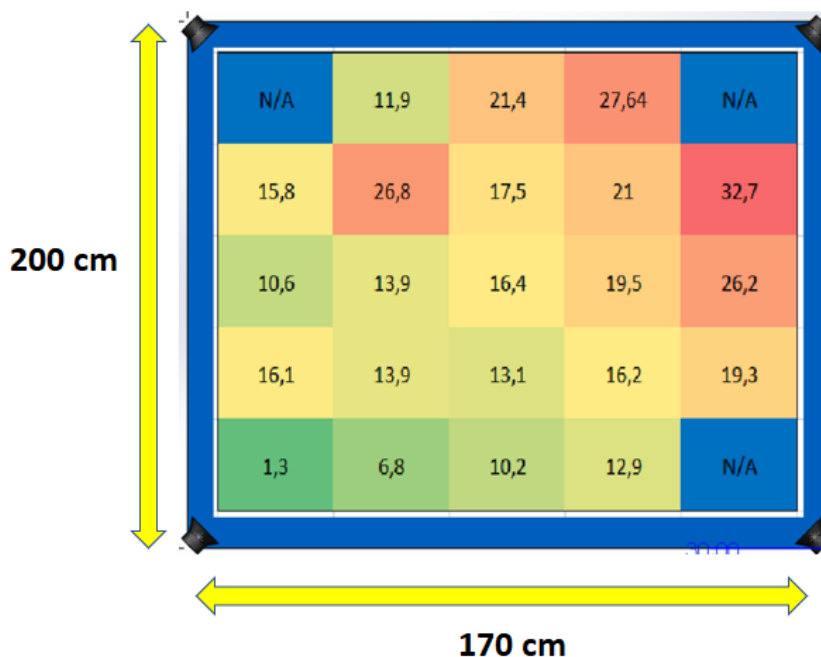


Figura 3-30: Desvio de valores do 2º teste no eixo z em centímetros, para o teste a 11 cm do chão (valores apresentados em centímetros).

Para finalizar a análise são apresentados os resultados para o eixo z do segundo teste é na Figura 3-30. Neste teste temos um desvio máximo de 32,7 cm e um mínimo de 1,3 cm. A média é de cerca de 16,9 cm. Praticamente não houve alteração para os resultados do primeiro teste. De notar que os valores de menor desvio convergem para o speaker com maior elevação na cota de z. O significativo desvio de valores para posições mais afastados deste speaker revela ambiguidade na cota z dos speakers e do microfone. Isto pode ser colmatado em espaços de maior dimensão com um maior diferencial de cotas em z entre speakers e microfone.

Finalmente é importante salientar que o sistema aqui proposto demorou em média cerca de 4,9 segundos a obter a localização, através do Matlab. O que nos permite uma taxa de atualização cerca de 0,2 Hz. Relembro que este valor foi otimizado quando se abandonou a ferramenta de correlação do Matlab que nos dava cerca de mais 0,0136 segundos de tempo de atualização. A taxa de atualização do sistema ainda podia ser melhorada caso seja implementado num sistema dedicado em vez do Matlab.

5. Conclusão e trabalhos futuros

Neste capítulo é apresentado um resumo do trabalho desenvolvido ao longo da dissertação e por último é elaborada uma perspetiva dos trabalhos futuros a desenvolver.

5.1 Conclusão

Os sistemas de ultrassons são uma aposta bastante válida quando falamos de localização espacial, considerando todos os sistemas que já existem com boa precisão, baixos consumos energéticos. quer nos elementos móveis quer nos fixos, fácil implementação e custo de instalação reduzidos. Para além de continuarem a ser uma boa aposta por tudo o que ainda podem ser explorados e melhorados. Com este trabalho foi possível criar uma plataforma de localização espacial absoluta de baixo custo e de utilizadores ilimitados que nem sempre é possível com outras tecnologias.

Apesar de não se conseguir tirar partido da resolução milimétrica, é de salientar a precisão centimétrica que o sistema de ultrassons neste trabalho oferece. Este estudo revelou ser interessante pela sua forte componente prática e a necessidade constante que houve de resiliência durante toda a fase de desenvolvimento MATLAB.

O trabalho foi sendo feito por forma a criar uma estrutura inicial que funcionasse dentro dos moldes pretendidos e posteriormente foi sendo melhorada e aperfeiçoada. Uma vez que esse trabalho nunca acaba e pode ser visto nos possíveis trabalhos futuros que ainda ficam por desenvolver. Foi possível ainda trazer uma componente inovadora para esta dissertação com um sistema de localização assíncrono de emissão contínua e em que os nós móveis se podem localizar de forma completamente autónoma.

Os objetivos propostos para este trabalho foram todos conseguidos, a ponto de se poder implementar o sistema desenvolvido num AMR ou AGV.

5.2 Trabalhos futuros

Apesar dos objetivos propostos terem sido concluídos, é possível melhorar e aperfeiçoar alguns aspetos, assim como explorar outras técnicas. De seguida é apresentada uma perspetiva dos trabalhos a desenvolver:

- **Baixar o PAPR para valores mais próximos de um:** Permitindo que, para além da fase das portadoras, também a amplitude possa mudar entre interações, dentro de certos limites.

- **Testar o sistema com um maior número de *speakers*:** Será espectável que a precisão do sistema aumente com o aumento do número de *speakers*. Para além disso, para espaços amplos, poderá não existir a cobertura total, devido à distância ou oclusão do sinal, logo, com um número elevado de *speakers* será mais fácil garantir o número mínimo de medidas para a obtenção da localização.
- **Analisar a contribuição do *hardware* para a precisão do sistema:** O uso de *hardware* de baixo custo e que não foi desenhado para operar nos ultrassons poderá ter tido algum impacto nos resultados. Para avaliar esse impacto pretende-se implementar o sistema com *hardware* calibrado e especialmente desenhado para operar na gama dos ultrassons.
- **Analisar a influencia da deslocação do objeto durante o processo de localização:** A localização do objeto pressupõe que este se encontra imóvel durante a aquisição de um período de sinal, ora, no caso dos AGVs, isso não é realista. Nesse sentido deverá ser feito um estudo para avaliar a robustez do sistema para diferentes velocidades.
- **Otimização energética do sistema:** Uma vez que o sistema é desenhado para localizar AGVs, os quais, na maioria dos casos, operam com baterias o sistema deverá ser desenvolvido para baixos consumos energéticos. Contudo o protótipo atual está implementado num computador convencional, portanto, deverá ser estudado a forma de implementação do sistema num computador de baixo consumo como por exemplo um Raspberry PI.
- **Implementação do sistema num AGV:** O sistema foi apenas validado em posições estáticas, contudo este deverá ser validado num AGV real de forma a avaliar o impacto da sua dinâmica no sistema de localização.
- **Testar o sistema em meio industrial:** Até ao momento o sistema foi testado num ambiente interior (onde existem diversas reflexões) contudo o ambiente industrial apresenta outros desafios como por exemplo o ruído ambiente e a presença de obstáculos.
- **Otimização da taxa de atualização do sistema:** Por enquanto o sistema apresenta uma taxa de atualização de uma medida por segundo o que pode não ser suficiente para determinadas aplicações. O aumento da taxa de atualização implica a redução do período do sinal, o que irá reduzir o número de portadoras disponíveis. Ora esta redução do número de portadoras poderá ter impacto na precisão do sistema. Nesse sentido, deverá ser estudada a influência do número de portadoras (devido à imposição da taxa de atualização) na precisão do sistema.

REFERÊNCIAS

- [1] E. A. Oyekanlu *et al.*, «A Review of Recent Advances in Automated Guided Vehicle Technologies: Integration Challenges and Research Areas for 5G-Based Smart Manufacturing Applications», *IEEE Access*, vol. 8, pp. 202312–202353, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3035729.
- [2] M. B. Alatise e G. P. Hancke, «A Review on Challenges of Autonomous Mobile Robot and Sensor Fusion Methods», *IEEE Access*, vol. 8, pp. 39830–39846, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2975643.
- [3] Wang, J., Zhang, M., Wang, Z., Sun, S., Ning, Y., Yang, X., & Pang, W. (2022). An Ultra-Low Power, Small Size and High Precision Indoor Localization System Based on MEMS Ultrasonic Transducer Chips. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2022.3148314>
- [4] Alatise, M. B., & Hancke, G. P. (2020). A Review on Challenges of Autonomous Mobile Robot and Sensor Fusion Methods. *IEEE Access*, 8, 39830–39846. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2975643>
- [5] «GPS.gov: GPS Accuracy». Acedido: 3 de março de 2022. [Em linha]. Disponível em: <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/>
- [6] Vieira, R. P. «Sistema de Localização de Ruídos Baseado em Redes de Sensores Sem Fio», *Relatórios finais de Iniciação Científica*, Universidade Federal do Amazonas <https://rii.ufam.edu.br/handle/prefix/2078>, 2011.
- [7] J. P. G. Pereira, «Sistema de localização de baixo consumo para ovelhas», *Dissertação de Mestrado*, Universidade de Aveiro, jul. 2018.
- [8] B. S. Chang e H. I. D. Monego, «Localizador Acústico por correlação cruzada e multilateração no domínio do tempo», Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.
- [9] Luis Pedro Marques Brás, «Desenvolvimento de sistema de localização indoor de baixo consumo», Universidade de Aveiro, 2009.
- [10] Jekabsons, G., Kairish, V., & Zuravlyov, V. (2011). «An Analysis of Wi-Fi Based Indoor Positioning Accuracy». *J. Riga Technical University*, 2011.
- [11] «Diferença entre FDMA, TDMA e CDMA – Acervo Lima». <https://acervolima.com/diferenca-entre-fdma-tdma-e-cdma/> (acedido 11 de março de 2022).

REFERÊNCIAS

- [12] «TDMA», *Wikipédia, a enciclopédia livre*. 17 de março de 2021. Acedido: 11 de março de 2022. [Em linha]. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=TDMA&oldid=60672512>
- [13] Kyman Huang, « DISTANCE ESTIMATION USING OFDM SIGNALS FOR ULTRASONIC POSITIONING », Master of Science in Electrical Engineering, Faculty of California Polytechnic State University, Junho de 2020.
- [14] VijayK. Garg, Yih-Chen Wang, «The Electrical Engeneering Handbook», editado por: WAI-KAI CHEN em 2005.
- [15] «FDMA», *Wikipédia, a enciclopédia livre*. 8 de março de 2018. Acedido: 11 de março de 2022. [Em linha]. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=FDMA&oldid=51455782>
- [16] Ernesto L. Pinto e Cláudio P. Albuquerque, «A Tecnica de Transmissão OFDM», Instituto Militar de Engenharia - Rio de Janeiro, junho de 2002.
- [17] Hameedah Sahib Hasan, «Ultra-Wideband based on Automated Guided Vehicle», Al-Furat Al-Awsat Technical University, 2021.
- [18] A. Ward, A. Jones and A. Hopper, "A new location technique for the active office," in *IEEE Personal Communications*, vol. 4, no. 5, pp. 42-47, Oct. 1997, doi: 10.1109/98.626982
- [19] N. B. Priyantha, A. Chakraborty, e H. Balakrishnan, «The Cricket location-support system», em *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking - MobiCom '00*, Boston, Massachusetts, United States, 2000, pp. 32–43. doi: 10.1145/345910.345917.
- [20] F. Rivard, J. Bisson, F. Michaud, e D. Letourneau, «Ultrasonic relative positioning for multi-robot systems», em *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, mai. 2008, pp. 323–328. doi: 10.1109/ROBOT.2008.4543228.
- [21] W. Zhang, J. Djughash, e S. Singh, «Parrots: A Range Measuring Sensor Network», Carnegie Mellon University, *Março, 2007*.
- [22] N. Davies, E. D. Mynatt, e I. Siio, Eds., *UbiComp 2004: ubiquitous computing: 6th international conference, Nottingham, UK, September 7-10, 2004: proceedings*. Berlin ; New York: Springer, 2004.
- [23] Y. Fukuju, M. Minami, H. Morikawa, e T. Aoyama, «DOLPHIN: an autonomous indoor positioning system in ubiquitous computing environment», em *Proceedings IEEE Workshop on Software Technologies for Future Embedded Systems. WSTFES 2003*, Hokkaido, Japan, 2003, pp. 53–56. doi: 10.1109/WSTFES.2003.1201360.

REFERÊNCIAS

- [24] A. Jiménez, J. Guevara, J. Ealo, F. Seco, J. Roa, e F. Ramos, «Subcentimeter-accuracy localization through broadband acoustic transducers», *IEEE International Workshop on Intelligent Signal Processing*, out. 2007.
- [25] M. Hazas e A. Hopper, «Broadband ultrasonic location systems for improved indoor positioning», *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 5, n. 5, pp. 536–547, mai. 2006, doi: 10.1109/TMC.2006.57.
- [26] J. R. Gonzalez e C. J. Bleakley, «High-Precision Robust Broadband Ultrasonic Location and Orientation Estimation», *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 3, n. 5, pp. 832–844, out. 2009, doi: 10.1109/JSTSP.2009.2027795.
- [27] D. F. Albuquerque, «Ultrasonic location system», *Sistema de localização com ultrassons*, Tese de Doutorado, Universidade de Aveiro, 2013.
- [28] F. Ijaz, Hee Kwon Yang, A. W. Ahmad and Chankil Lee, "Indoor positioning: A review of indoor ultrasonic positioning systems," *2013 15th International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT)*, 2013, pp. 1146-1150.
- [29] Leonardo Lucas De Assis Silva, «Transmissão de Imagens Utilizando a Tecnologia F-OFDM », Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Universidade Federal de Goiás, 2018.
- [30] Mrs.S.S.GHORPADE, Prof.Dr.Mrs.S.V.SANKPAL, « Behavior of OFDM System Using MATLAB Simulation », *INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE TECHNOLOGY AND RESEARCH*, Maio de 2013.
- [31] «Fig: 3 OFDM compared to FDM for Multiband OFDM[4] (Orthogonal Frequency...», *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/fig5_216554819 (acedido 23 de fevereiro de 2022).
- [32] «Cross-correlation MATLAB_xcorr». <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/xcorr.html> (acedido 23 de fevereiro de 2022).

