



Miguel Lopes
Mestre

Localização baseada em RF para espaços interiores



Miguel Lopes
Mestre

Localização baseada em RF para espaços interiores

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Professor Alexandre Manuel Moutela Nunes da Mota, Professor do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro, e coorientação do Mestre Rui Miguel de Bernardes Rebelo da empresa Micro I/O.

o júri

presidente

Prof. Doutor Paulo Bacelar Reis Pedreiras
Professor Auxiliar do Departamento de Eletrónica e Telecomunicações da
Universidade de Aveiro

vogais

Prof. Doutor Valter Filipe Miranda Castelão da Silva
Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Águeda da
Universidade de Aveiro

Mestre Rui Miguel de Bernardes Rebelo
Coorientador e Mestre em Eletrónica e Telecomunicações

agradecimentos

No final desta caminhada, é com grande apreço que dirijo este agradecimento a todos os que deram o seu contributo para que a realização deste projeto fosse possível.

À minha família que acreditou em mim e sempre esteve presente, incentivando-me e apoiando-me incondicionalmente, durante o meu percurso académico.

Aos meus amigos pelo apoio prestado e pelos bons momentos vividos nos tempos de lazer da vida académica.

Ao meu Orientador, Alexandre Mota, por me proporcionar um acordo com a empresa Micro IO e por todas as recomendações sugeridas.

À empresa Micro IO, que me recebeu com cordialidade e profissionalismo, e me possibilitou desenvolver este trabalho em ambiente laboral.

A todos os meus colegas de trabalho, da sala de *hardware* da Micro IO, que me auxiliaram com os seus conhecimentos, em especial, ao Mestre Rui Rebelo, Co-Orientador da presente dissertação, que sempre me estimulou e levou a que o presente projeto chegasse a bom termo.

palavras-chave

rádio frequência, localização, baixo-consumo, comunicação sem fios.

resumo

Atualmente tem-se registado uma evolução acentuada nos sistemas de localização em tempo real, dada a vasta gama de aplicações nos vários setores do mercado, tais como a saúde, os transportes, a segurança, entre outros; reconhecendo-se a necessidade de disponibilizar serviços inovadores, capazes de responder às necessidades do mundo moderno.

A Micro IO, empresa no âmbito da eletrónica, pretende desenvolver um sistema de localização para crianças em espaços interiores.

Neste contexto, na presente dissertação, propõe-se implementar um sistema de localização para pessoas e bens em espaços interiores, com possibilidade de abranger espaços exteriores, que seja customizável e acessível ao utilizador comum. A localização é disponibilizada ao utilizador por uma aplicação que representa a posição estimada num mapa 2D.

Keywords

radio frequency, localization, low power, wireless communications.

Abstract

Nowadays it has been noticed a marked evolution in real time location systems given the wide range of applications in various market sectors such as health, transport, security, among others; recognizing up the need to provide innovative services able to suit the needs of the modern world.

The Micro IO, an enterprise directed to the electronic market, wants to develop an indoor location system for children.

In this context, at the present dissertation, it is proposed to develop an indoor location system for people and assets, with the possibility to cover outdoor spaces that is customizable and accessible to the average user. The location is available to the user by an application that draws the estimated position on a 2D map.

Conteúdo

1. Introdução.....	1
1.1 Motivação	1
1.2 Enquadramento	2
1.3 Objetivos.....	2
1.4 Organização do documento.....	2
2. Estado da Arte.....	5
2.1 Enquadramento histórico	5
2.2 Métricas de desempenho	6
2.2.1 Exatidão	6
2.2.2 Precisão	6
2.2.3 Taxa de atualização	6
2.2.4 Latência.....	7
2.2.5 Área de cobertura.....	7
2.2.6 Número de utilizadores	7
2.2.7 Adaptabilidade/robustez	7
2.2.8 Segurança e privacidade	7
2.2.9 Integridade e disponibilidade.....	7
2.2.10 Consumo energético.....	8
2.2.11 Custo.....	8
2.2.12 Complexidade	8
2.2.13 Usabilidade	8
2.2.14 Normas	8
2.3 Métricas de sinal rádio	9
2.3.1 Tempo de Chegada (<i>Time of Arrival</i> , ToA).....	9

2.3.2	Diferença de Tempo de Chegada (<i>Time Difference of Arrival</i> , TDoA) ..	10
2.3.3	Ângulo de Chegada (<i>Angle of Arrival</i> , AoA)	10
2.3.4	Tempo de Ida e Volta (<i>Round-trip Time</i> , RTT).....	10
2.3.5	Fase de Chegada (<i>Phase of Arrival</i> , PoA)	11
2.3.6	Intensidade do sinal recebido (<i>Received Signal Strength</i> , RSS).....	11
2.4	Técnicas de Localização	12
2.4.1	Por proximidade	12
2.4.2	Métodos geométricos.....	13
2.4.3	Mapeamento	14
2.4.4	Inercial.....	15
2.5	Tecnologias Rádio Frequência usadas nos sistemas de localização.....	15
2.5.1	<i>Radio Frequency Identification</i> (RFID).....	15
2.5.2	Bluetooth.....	16
2.5.3	<i>Wireless Local Area Network</i> (WLAN)	16
2.5.4	ZigBee	17
2.5.5	<i>Ultra Wideband</i> (UWB)	17
2.5.6	Comparação das Tecnologias Radio Frequência.....	18
2.6	Sistemas de localização Híbridos	18
2.7	Produtos de mercado	19
2.8	Sumário	20
3.	Tecnologia adotada e conceitos relevantes	21
3.1	Tecnologia UWB	21
3.1.1	Conceitos	21
3.1.2	Largura de Banda	22
3.1.3	Vantagens	23
3.1.4	Desvantagens	27

3.1.5	Norma IEEE 802.15.4	29
3.1.6	Regulamentos e limites de emissão impostos	30
3.2	Circuito Integrado UWB: DWM1000	32
3.3	Métrica de medição de sinal RF	33
3.4	Sumário	37
4.	Possíveis aplicações do sistema de localização.....	39
4.1	Saúde.....	39
4.2	Segurança.....	39
4.3	Logística	40
4.4	Sumário	40
5.	Arquitetura do Sistema.....	41
5.1	Elementos do Sistema	41
5.1.1	Nó móvel.....	41
5.1.2	Nó fixo.....	42
5.1.3	Infraestrutura de Comunicações	42
5.1.4	Aplicação Servidora	42
5.2	Modo de Funcionamento.....	43
5.3	Estrutura de rede.....	46
5.4	Múltiplo Acesso	47
5.4.1	Receção errada ou ausência de resposta no nó móvel.....	47
5.4.2	Receção errada da mensagem final de medida.....	49
5.5	Sumário	51
6.	Desenvolvimento e implementação do sistema.....	53
6.1	<i>Hardware</i>	53
6.1.1	Nó móvel.....	53
6.1.2	Nó fixo.....	55
6.2	<i>Firmware</i> , Configurações e Aplicação.....	57

6.2.1	<i>Firmware</i>	57
6.2.2	Configuração do módulo <i>WiFi</i>	62
6.2.3	Aplicação desenvolvida.....	63
6.3	Sumário	66
7.	Validação do Sistema de Localização: Testes e Resultados	67
7.1	Análise das medidas realizadas	67
7.2	Análise gráfica do ensaio do sistema	73
7.3	Autonomia do nó móvel	74
7.4	Sumário	80
8.	Conclusões e Trabalho Futuro	81
8.1	Conclusões.....	81
8.2	Trabalho Futuro.....	81
Anexos	83
A1.	Esquemático do Nó Móvel	84
A2.	Esquemático do Nó Fixo	85
B1.	Traçado da PCB do Nó Móvel.....	87
B2.	Traçado da PCB do Nó Fixo	88
C1.	Protótipo do Nó Móvel	89
C2.	Protótipo do Nó Fixo	89
Bibliografia	91

Lista de Figuras

Figura 2.1: Sistemas de localização em espaço interior. [4]	9
Figura 2.2: Posicionamento dos nós fixos (estrutura cúbica).	11
Figura 2.3: Diagrama das Técnicas de Localização.	12
Figura 2.4: Representação da Técnica de Angulação. [8]	13
Figura 2.5: Ilustração da Triangulação baseada em distâncias. [8]	13
Figura 2.6: Representação da interseção de duas curvas hiperbólicas. [8] ..	14
Figura 3.1: Sinal de banda estreita em (a) no domínio de tempo e em (b) no domínio da frequência.	21
Figura 3.2: <i>Duty cycle</i> de um pulso UWB.	22
Figura 3.3: Sinal UWB em (a) no domínio de tempo e em (b) no domínio da frequência.	22
Figura 3.4: Densidade espectral de potência dos sinais UWB, de banda estreita e banda larga.	23
Figura 3.5: Fenómeno de multipercurso em (a), os efeitos multipercurso nos sinais de banda estreita em (b) e os efeitos multipercurso nos sinais UWB em (c).	25
Figura 3.6: Arquitetura dos transmissores e recetores de sinais de banda estreita em (a) e de sinais UWB em (b).	26
Figura 3.7: Estrutura da trama UWB segundo a norma 802.15.4.	29
Figura 3.8: Módulo DWM1000. [30]	32
Figura 3.9: Diagrama de blocos do módulo DWM1000. [29]	33
Figura 3.10: Diagrama conceptual da sincronização com fios dos nós fixos. [33]	34
Figura 3.11: Esquema de TWR. [34]	35

Figura 3.12: Esquema de TWR simétrico de dois sentidos. [36]	36
Figura 5.1: Diagrama de blocos do nó móvel.	41
Figura 5.2: Diagrama de blocos do nó fixo.	42
Figura 5.3: Diagrama de blocos do sistema.	43
Figura 5.4: TWR simétrico de dois sentidos simplificado (TWRS).	44
Figura 5.5: Formato do campo de dados das mensagens UWB.	44
Figura 5.6: Diagrama temporal da atividade do nó móvel.	45
Figura 5.7: Formato do campo de dados das mensagens UDP/IP.	46
Figura 5.8: Estrutura da rede.	46
Figura 5.9: Transmissão em simultâneo de dois nós móveis no início da comunicação.	48
Figura 5.10: Nó móvel tentando conectar-se a um nó fixo já ocupado.	48
Figura 5.11: Transmissão em simultâneo de dois nós fixos.	49
Figura 5.12: Transmissão em simultâneo de dois nós móveis que transmitem a mensagem final de medida.	49
Figura 5.13: Diagrama temporal da atividade do nó Fixo de ID mais baixo.	50
Figura 6.1: Protótipo do nó móvel (dimensões reais: 70mm x 43 mm).	54
Figura 6.2: Protótipo do nó fixo (dimensões reais: 97mm x 57 mm).	56
Figura 6.3: Transações SPI de leitura e escrita.	59
Figura 6.4: Janela da aplicação relativa à localização de um nó móvel.	64
Figura 6.5: Versão final da janela da aplicação.	65
Figura 7.1: Ensaios LOS em a) e NLOS em b).	67
Figura 7.2: Distribuição real vs. distribuição normal (50cm LOS).	68

Figura 7.3: Distribuição real vs. distribuição normal (150cm LOS).	68
Figura 7.4: Distribuição real vs. distribuição normal (300cm LOS).	69
Figura 7.5: Distribuição real vs. distribuição normal (700cm LOS).	69
Figura 7.6: Distribuição real vs. distribuição normal (1200cm LOS).	70
Figura 7.7: Distribuição real vs. distribuição normal (200cm NLOS).	71
Figura 7.8: Distribuição real vs. distribuição normal (500cm NLOS).	71
Figura 7.9: Janela da aplicação.	74
Figura 7.10: Consumo energético do nó móvel.	75
Figura 7.11: Consumo energético do nó móvel ampliado no intervalo de tempo de comunicação.	76
Figura 7.12: Consumo energético do nó móvel com retransmissões.	77
Figura 7.13: Captura do Wireshark.	78
Figura 7.14: Perfil aproximado da bateria LIR2450.	79
Figura 7.15: Perfil de descarga característica da bateria LIR2450. [45]	79

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Tecnologias de rádio frequência.	18
Tabela 2.2: Sistemas de localização baseados em UWB.	19
Tabela 3.1: Vantagens da tecnologia UWB.	27
Tabela 3.2: Desvantagens da tecnologia UWB.	28
Tabela 3.3: Requisitos técnicos da tecnologia UWB. [27]	31
Tabela 7.1: Resultados do ensaio do sistema.	72

Lista de Acrónimos

2D	Two-Dimensional (bidimensional)	GLONASS	Global Navigation Satellite System
3D	Three-Dimensional (tridimensional)	GPS	Global Positioning System
ADC	Analog to Digital Converter (conversor analógico digital)	HF	High Frequency (alta frequência)
AoA	Angle of Arrival (ângulo de chegada)	IC	Integrated Circuit (circuito integrado)
AP	Access Point (ponto de acesso)	ICSP	In-Circuit Serial Programming
API	Application Programming Interface (interface de programação de aplicação)	ID	Identity (identidade)
BLE	Bluetooth Low Energy	IP	Internet Protocol (protocolo de internet)
BPM	Burst Position Modulation	IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
BPSK	Binary Phase Shift Keying	IEEE-SA	Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards Association
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor	LED	Light Emitting Diode (díodo emissor de luz)
CRC	Cyclic Redundancy Check	LF	Low Frequency (baixa frequência)
.csv	comma separated values (valores separados por vírgulas)	LORAN	Long Range Navigation System
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol	LOS	Line of Sight (linha de vista)
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	LR-WPAN	Low-Rate Wireless Area Network
FCC	Federal Communications Commission	NAVSTAT	Navy Navigation Satellite System
		NLOS	Non Line of Sight (sem linha de vista)

PCB	Printed Circuit Board (placa de circuito impresso)	SNR	Signal-to-Noise Ratio (relação sinal-ruído)
PoA	Phase of Arrival (fase de chegada)	SPI	Serial Peripheral Interface
PG	Process Gain (ganho de processo)	SYNC	Synchronization (sincronização)
PLL	Phase Locked Loop	TCP	Transmission Control Protocol
PHR	Physical Header (cabeçalho físico)	ToA	Time of Arrival (tempo de chegada)
PWM	Pulse With Modulation (modulação por largura de pulso)	ToDA	Time Difference of Arrival (diferença de tempo de chegada)
RF	Radio Frequency (radio frequência)	TOF	Time of Flight (tempo de voo)
RFID	Radio Frequency Identification	TWR	Two Way Ranging
RGB	Red Green Blue (vermelho verde azul)	TWRS	Two Way Ranging Simplificado
RSS	Received Signal Strength (Intensidade do sinal recebido)	Tx	Transmission (transmissão)
RTCC	Real Time Clock and Calendar (relógio e calendário de tempo real)	UDP	User Datagram Protocol
RTT	Round-trip Time (tempo de ida e volta)	UHF	Ultra High Frequency (frequência ultra alta)
RTLS	Real Time Location Systems (sistemas de localização de tempo real)	USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (transmissor/recetor universal síncrono e assíncrono)
Rx	Reception (receção)	USB	Universal Serial Bus
SFD	Start of Frame Delimiter (delimitador de início de trama)	UWB-IR	Ultra Wideband Impulse Radio (impulsos de rádio)
SHF	Super High Frequency (super alta frequência)	UWB	Ultra Wideband (banda ultra larga)
SHR	Synchronization Header Preamble (cabeçalho de sincronização de preâmbulo)	µC	Microcontrolador
		WPAN	Wireless Personal Area Networks (rede local sem fios)

1. Introdução

A evolução da tecnologia verificada na última década, tem permitido o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos cada vez mais pequenos, com melhor desempenho e de menor consumo, cabendo aos empreendedores aplicá-los de forma oportuna para conceber um produto/projeto inovador, face às expectativas dos utilizadores.

Os sistemas de localização em tempo real (*Real Time Location Systems*, RTLS) que têm como objetivo identificar e rastrear pessoas ou objetos em tempo real (geralmente no interior de edifícios ou em espaços delimitados) são motivo de pesquisa e análise neste trabalho.

Os efeitos multipercurso, ou seja, as condições do meio a que as ondas de radio frequência são submetidas (desde que são enviadas até serem recebidas no recetor), os diferentes cenários interiores sem linha de vista, a atenuação e dispersão do sinal devido à densidade de obstáculos presente no espaço interior e a variação temporal de pessoas e objetos em movimento, são desafios exigentes a superar com o objetivo de atingir uma precisão adequada, através de um sistema de localização que possa assegurar a monitorização de bens ou pessoas em espaço interior, com possibilidade de abranger também ambientes exteriores.

O leque de aplicações desenvolvidas com base neste tipo de sistemas tem motivado uma grande adesão por parte de diversos domínios do mercado, sendo por isso, uma área em constante progresso.

1.1 Motivação

Ao longo do meu percurso académico adquiri interesse pelos sistemas embutidos, sistemas de tamanho reduzido e de baixo custo, face às inúmeras possibilidades de aplicação.

Para além disso, aquando do diálogo com o Mestre em Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações Rui Miguel de Bernardes Rebelo, surgiu a possibilidade de desenvolver um projeto no âmbito dos sistemas de localização, pela qual manifestei entusiasmo, dado tratar-se de uma área com uma ampla potencialidade de aplicações.

Associado ao referido anteriormente, adquiri conhecimentos na temática em questão, ao frequentar a disciplina: “Projeto em Engenharia Eletrónica” (correspondente ao último semestre de licenciatura); na qual foi realizado o projeto: “FollowMe”; que consistia igualmente num sistema de localização para espaços interiores; o que me despertou mais interesse em aprofundar a investigação nesta área e desenvolver o presente projeto.

1.2 Enquadramento

Este projeto enquadra-se na necessidade da Micro IO (uma empresa de eletrónica que possui parcerias com a Universidade de Aveiro), pretender implementar um sistema de localização para crianças em espaços interiores com a possibilidade de abranger espaços exteriores.

O sistema a desenvolver deverá ser capaz de, conhecendo a posição absoluta dos nós fixos, localizar os nós móveis, permitindo também sinalizar diversos estados dos nós móveis a pedido da aplicação servidora.

Pretende-se que este sistema seja de baixo consumo e baseado na propagação de ondas rádio frequência, para além de ser customizável e acessível ao utilizador comum.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um sistema de localização para bens e pessoas em espaços interiores. Propõe-se que o sistema cumpra os seguintes requisitos:

- Ser simples em recursos/infraestrutura, de modo a que a instalação seja fácil, económica e adaptável aos vários espaços interiores. A utilização de um número reduzido de dispositivos localizadores por unidade de área é igualmente importante pois tem uma relação direta no custo do sistema;

- Ter baixa manutenção, ou seja, que depois de realizada a instalação seja necessário a mínima intervenção de técnicos para resolver eventuais falhas que possam ocorrer no sistema;

- Ser seguro, customizável e acessível ao utilizador comum;

- Possuir um erro de localização inferior a 1m;

- Que os dispositivos móveis tenham um baixo consumo de energia que permita uma autonomia de 24h quando o sistema se encontra em funcionamento e com uma taxa de atualização mínima de 1Hz.

1.4 Organização do documento

Para além do capítulo introdutório, capítulo 1, esta dissertação apresenta a seguinte estrutura:

- Capítulo 2, Estado da Arte – é dedicado ao estudo das técnicas e tecnologias de rádio frequência, que são usadas na atualidade, com o objetivo de efetuar a localização em espaços interiores, definindo-se alguns dos conceitos úteis para a compreensão dos capítulos seguintes. Também é realizada uma análise de produtos e protótipos no âmbito dos sistemas de localização.

- Capítulo 3, Tecnologia adotada e conceitos relevantes – é efetuada uma descrição mais detalhada da tecnologia adotada para o desenvolvimento do projeto, a tecnologia de banda ultra larga, para além de se citar outros conceitos importantes para a compreensão do princípio de funcionamento do sistema.

- Capítulo 4, Possíveis aplicações do sistema de localização – são apresentadas e descritas de forma breve algumas das principais aplicações presentes e futuras, do sistema de localização a realizar neste projeto.

- Capítulo 5, Arquitetura do Sistema – centra-se no princípio de funcionamento do sistema de localização, bem como na caracterização do papel dos elementos que fazem parte da sua arquitetura.

- Capítulo 6, Desenvolvimento e implementação do sistema – são especificados os procedimentos efetuados no processo de desenvolvimento do *hardware* e *firmware* para a realização do protótipo do sistema de localização.

- Capítulo 7, Validação do Sistema de Localização: Testes e Resultados – são caracterizados os testes de campo experimentais realizados durante o ensaio do sistema analisando-se o seu desempenho. Para tal, elaboraram-se gráficos baseados nas medidas de distância obtidas.

-Capítulo 8, Conclusão e Trabalho Futuro – é dedicado às conclusões a retirar deste trabalho considerando os resultados obtidos, como também se propõe alguns aperfeiçoamentos a realizar no futuro.

2. Estado da Arte

Neste capítulo é realizada uma descrição relativa ao estudo efetuado no âmbito dos sistemas de localização desenvolvidos e comercializados até ao presente. É efetuada uma breve apresentação da evolução dos sistemas de localização e são mencionadas as métricas de desempenho e de sinal rádio frequência, bem como as técnicas e tecnologias adotadas para a implementação de um sistema que cumpra os objetivos propostos.

2.1 Enquadramento histórico

Desde os tempos em que os primeiros ancestrais da espécie humana habitavam a terra, o homem sentiu necessidade de se localizar.

O homem primitivo, quando partia à procura de alimento, para pescar e caçar, utilizava simples referências geográficas, como pedras e características da vegetação para saber o caminho de regresso.

Mais tarde, na época dos descobrimentos, a bússola, o astrolábio, a balestilha e o quadrante permitiram a navegação e localização em alto mar, apesar de serem dependentes das condições atmosféricas, sendo as suas medições baseadas na posição dos astros. Com estas ferramentas, deu-se uma grande evolução na cartografia, conseguindo-se o esboço de mapas do território marítimo e terrestre, bastante próximos dos atuais. [1]

Posteriormente, na 1ª Guerra Mundial, o sonar, permitiu a deteção dos submarinos Alemães e, hoje em dia, continua a ser usado por pescadores, engenheiros e oceanógrafos, para identificar objetos em profundidade e estudar o relevo em pleno Oceano.

Com a 2ª Guerra Mundial, o radar, até aí uma ferramenta em estudo, sofreu uma grande inovação, pois foi essencial para detetar a aproximação de aviões inimigos. Ainda é usado na atualidade, por exemplo para controlo do tráfego aéreo comercial e pela indústria aeroespacial. Para além disso, a 2ª Guerra Mundial, possibilitou uma evolução surpreendente da eletrónica de rádio frequência, surgindo assim, pouco tempo depois, os primeiros sistemas de localização modernos baseados na propagação de ondas rádio, o LORAN (*Long Range Navigation System*) e o DECCA (sistema de navegação baseado na comparação contínua de fase a baixa frequência).

Uns anos depois, foram desenvolvidos o Omega, um sistema global de navegação de baixa frequência, e o NAVSAT (*Navy Navigation Satellite System*) primeiros sistemas de localização à escala global, surgindo mais tarde o GPS (*Global Positioning System*), uma solução inovadora face aos sistemas existentes até à altura. [2]

O GPS é o sistema mais comum a nível mundial, sendo constituído por 24 satélites que rodeiam o globo e possibilitam ao utilizador obter a sua posição

com a precisão de alguns metros. Apesar disso, tem sido desenvolvidas alternativas, nomeadamente o GLONASS (*Global Navigaton Satellite System*) [3], já em funcionamento, desenvolvida pela Força Aérea Russa, para suporte ao GPS em caso de falha. Outros, como o Galileo e o Compass [3], também são sistemas de escala global com o uso da órbita terrestre como suporte à sua infraestrutura, que estão em fase de desenvolvimento. [3]

Entretanto, o mundo tecnológico continua em grande evolução desde o início do presente século. Neste contexto, os utilizadores são cada vez mais exigentes e a localização com uma maior precisão, nomeadamente em espaços interiores, tem motivado o desenvolvimento de diversos sistemas alternativos ao GPS.

2.2 Métricas de desempenho

Na presente subsecção, são abordadas as métricas utilizadas para avaliar a qualidade ou desempenho dos sistemas de localização com base em [4], [5], [6] e [7]. A exatidão, a precisão, a taxa de atualização, a latência, a área de cobertura, o número de utilizadores, a adaptabilidade/robustez, a segurança e privacidade, a integridade e disponibilidade, o consumo energético, a complexidade, a interface e as normas a respeitar são conceitos essenciais a analisar para o desenvolvimento de um sistema de localização, que serão descritos de forma breve nos tópicos seguintes.

2.2.1 Exatidão

É medida pela diferença entre a posição real e a posição estimada pelo sistema de localização. Para avaliar o desempenho considera-se o erro máximo medido numa série de amostras.

2.2.2 Precisão

É avaliada pela consistência e fiabilidade do sistema que é determinada pelo desvio padrão de uma série de repetições da mesma análise.

2.2.3 Taxa de atualização

Define-se como a frequência de atualização da posição estimada pelo sistema. Usualmente é determinada uma nova posição, a cada intervalo de tempo constante, predefinido no projeto do sistema. A atualização também pode ser assíncrona, isto é, desencadeada por um pedido do utilizador ou por uma medida externa.

2.2.4 Latência

É o atraso verificado desde o pedido até que a informação esteja disponível ao utilizador. O tempo de atraso é geralmente devido ao tempo de recolha de dados e processamento. Na localização em tempo real, requere-se que o tempo de latência seja inferior ao período de atualização.

2.2.5 Área de cobertura

A área delimitada (por exemplo uma sala, corredor ou edifício), definida em m^2 ou m^3 , em que o serviço de localização é funcional, designa-se de área de cobertura.

2.2.6 Número de utilizadores

É avaliado pelo número de pedidos, em simultâneo, que o sistema consegue suportar na sua área de cobertura.

2.2.7 Adaptabilidade/robustez

Define-se como a capacidade do sistema para se adaptar às condições do meio. Assim, um sistema que tenha um bom desempenho em diferentes cenários diz-se robusto. Um sistema adaptável também permite uma calibração menos repetitiva do sistema.

2.2.8 Segurança e privacidade

É a capacidade de proteção do sistema contra intrusões exteriores ou acessos não autorizados, que possam roubar, danificar, alterar informação, ou até mesmo destruir o *hardware*, causando anomalias no funcionamento do sistema. É também importante garantir ao utilizador a confidencialidade da informação recolhida para determinar a localização.

2.2.9 Integridade e disponibilidade

Prende-se com a garantia assegurada acerca das especificações do sistema, como por exemplo a percentagem de tempo em que o sistema está em funcionamento sem falhas, bem como a respeitar os requisitos mínimos de precisão e alcance especificados.

2.2.10 Consumo energético

É importante projetar um sistema de baixo consumo, sobretudo quando se recorre a uma bateria, que tem energia limitada e tempo de vida finito, para alimentar o dispositivo que se pretende localizar.

2.2.11 Custo

Prende-se não só com o custo do material, da instalação e manutenção, mas também com o período de pesquisa e desenvolvimento do sistema no qual é necessário mão-de-obra qualificada. Uma análise de mercado é essencial para estabelecer o limite de despesas na conceção e marketing de um produto.

2.2.12 Complexidade

Avaliada pelo *hardware* necessário para implementação e pela complexidade dos algoritmos e protocolos de comunicação, parâmetros que podem influenciar o tempo de resposta do sistema.

2.2.13 Usabilidade

O peso, a acessibilidade e simplicidade no uso do sistema também são aspetos ter em consideração já que são requisitos valorizados pelos utilizadores.

2.2.14 Normas

É necessário verificar se o sistema cumpre todos os requisitos legais, como por exemplo, no caso do uso de energia eletromagnética para propagação de ondas rádio frequência, é necessário respeitar os limites de exposição de radiação do corpo humano impostos pelas entidades reguladoras.

Existe um compromisso entre todos estes fatores de modo a projetar e implementar um sistema de localização.

Na figura 2.1 apresenta-se um gráfico retirado de [4], representando o alcance (*Coverage*) em função da precisão (*Accuracy*), requisitos importantes no mercado e aplicações sistemas de RTLS para espaços interiores.

Para localização de crianças em espaço interior, que é englobada pelo balão de *Ambient Assisted Living* (Assistência à Autonomia no Domicílio), é possível observar que é requerido um erro de localização inferior a 1m e um alcance entre aproximadamente 5m e 100m.

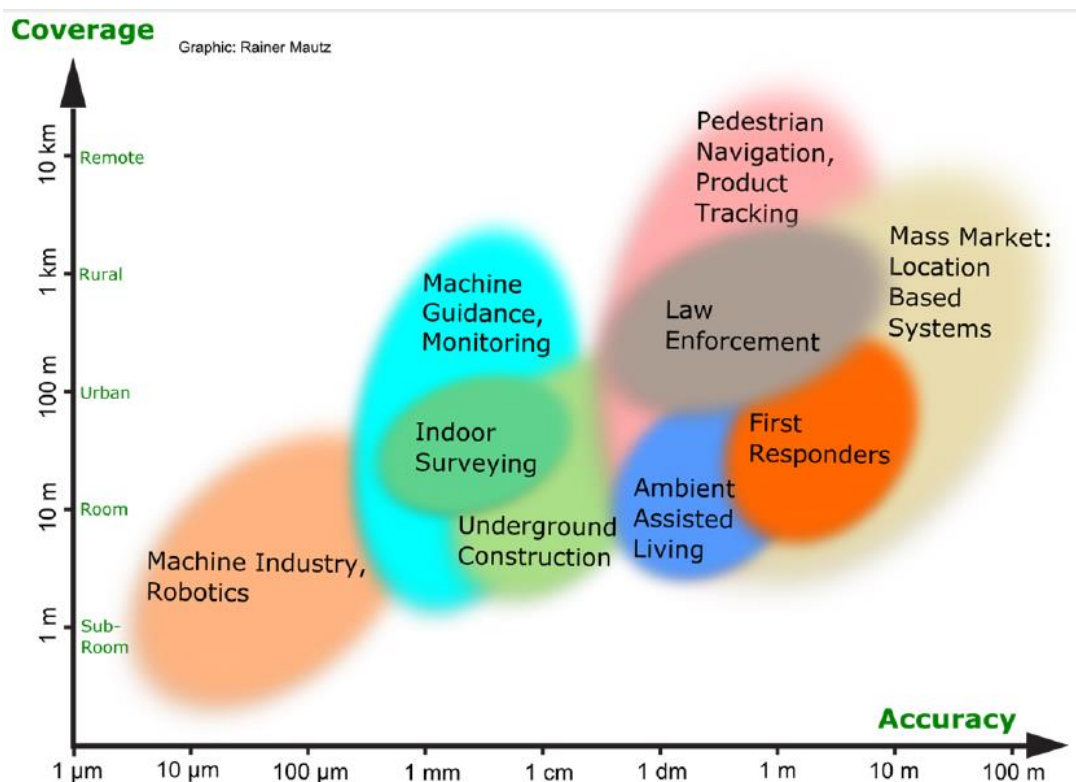


Figura 2.1: Sistemas de localização em espaço interior. [4]

2.3 Métricas de sinal rádio

Neste tópico são analisadas as técnicas de medida, baseadas nas características dos sinais de rádio frequência, que permitem estimar a localização relativa dos nós móveis, dispositivos a localizar, relativamente aos nós fixos ou localizadores, cuja posição absoluta é conhecida previamente.

2.3.1 Tempo de Chegada (*Time of Arrival*, ToA)

É uma técnica baseada na sincronização entre dois nós, pontos de conexão de uma rede de comunicações (terminais ou de redistribuição), de modo a medir o tempo de chegada do sinal rádio enviado, permitindo assim calcular a distância através da velocidade de propagação. Assim, esta técnica tem a desvantagem de requerer uma sincronização precisa entre os dispositivos, além de necessitar de linha de vista entre nós, caso contrário o erro do tempo medido pode ser elevado, isto é, a diferença entre o tempo medido e o tempo teórico, considerando a distância a que se encontram os nós sincronizados, pode ser elevada.

Através deste método de medição foram desenvolvidos algoritmos para obter a localização, como por exemplo o método do “vizinho mais próximo”, estimando-se a localização com base nas estações base/pontos de referência mais próximos do utilizador, sendo estes os nós fixos da rede de comunicação

que servem para medir tempos aos nós móveis, que tal como o nome indica, são os dispositivos com posição variável da rede de comunicações, dos quais se pretende determinar a localização. [5][6][7]

2.3.2 Diferença de Tempo de Chegada (*Time Difference of Arrival, TDoA*)

Este método surgiu para substituir o ToA devido à necessidade de sincronização dos nós recetores e emissores. É medida a diferença do tempo de chegada do sinal transmitido entre 4 recetores que produzem curvas hiperbólicas no espaço de localização em 3D no qual o nó móvel se encontra. Assim, através da interseção de 3 hipérbolas (sendo necessário pelo menos 3 nós recetores) é possível calcular a localização do dispositivo móvel em 2D, requerendo-se apenas a sincronização dos recetores. [5][6][7]

2.3.3 Ângulo de Chegada (*Angle of Arrival, AoA*)

É um processo que mede o ângulo de chegada do sinal rádio, e por isso, através da intersecção das medidas em dois nós diferentes é possível obter a localização num plano 2D. Com três nós é possível obter uma localização em 3D. Porém este método exige a necessidade de antenas direccionais ou técnicas de processamento de sinal avançadas, requisitos estes, que normalmente não se encontram disponíveis nos equipamentos usados na localização em espaço interior. Para além disso, o seu uso em ambientes fechados não é viável pois os efeitos de propagação multipercurso, isto é, as condições do meio a que o sinal rádio é submetido desde que é enviado até ser recebido no recetor, conduzem a um erro significativo na localização da fonte devido aos sinais refletidos. [5][6][7]

2.3.4 Tempo de Ida e Volta (*Round-trip Time, RTT*)

Nesta técnica mede-se o intervalo de tempo de ida e volta que o sinal demora do emissor ao recetor. Como a medição do tempo é local não existe a necessidade de sincronismo verificada no ToA. No entanto, o tempo de atraso/processamento de sinal no nó de resposta também é interpretado como tempo de trânsito, fator que pode ser ignorado para sistemas de comunicações a longas e médias distâncias, mas que para pequenas distâncias causa erros significativos. Este atraso pode ser medido *a priori*, durante a fase de calibração do sistema permitindo uma minimização do erro.

Os algoritmos desenvolvidos com base no ToA também são aplicáveis para este método de medida de tempo. [6]

2.3.5 Fase de Chegada (*Phase of Arrival, PoA*)

A partir da transmissão de sinais sinusoidais a uma frequência predefinida, isto é, o número de ciclos completos que ocorrem durante um segundo, mede-se o desfasamento da portadora (uma onda eletromagnética sobre a qual é transmitido o sinal com a informação, já que as propriedades são adequadas ao meio de transmissão) da fonte ao recetor. Para isso, é necessário que no envio os sinais tenham um deslocamento de fase nulo, um atraso de propagação finito entre nós, que é expresso como uma fração do comprimento de onda do sinal, e que os transmissores sejam posicionados nos vértices de um espaço cúbico imaginário, representado na figura 2.2.

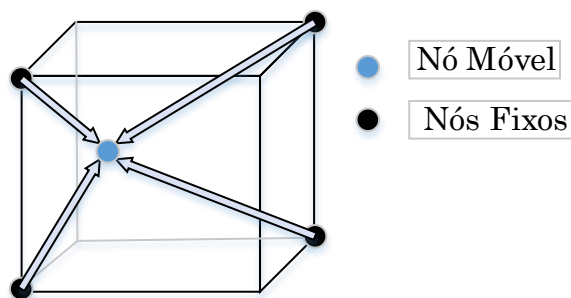


Figura 2.2: Posicionamento dos nós fixos (estrutura cúbica).

Esta abordagem não é comum, pois para além da sua aplicação ser afetada pela interferência multipercurso, causando ambiguidades nas medidas, é pouco adaptável, complexa e implica custo elevados devido ao posicionamento e número elevado de nós fixos necessários para que o sistema seja funcional e com uma precisão razoável em espaço interior. [7]

2.3.6 Intensidade do sinal recebido (*Received Signal Strength, RSS*)

Em ambiente interior é difícil contornar os efeitos indesejados provocados pelo multipercurso na transmissão de sinais rádio. Assim, como alternativa às técnicas anteriores, a distância entre o nó localizador e o nó móvel é estimada com base na potência do sinal emitido, que sofre atenuação durante a propagação até ser recebido.

Esta é uma das técnicas mais usadas recentemente, existindo modelos teóricos e empíricos de modo a traduzir a atenuação de potência entre o emissor e recetor em distância. Apesar disso, estes modelos não têm em conta efeitos de sombra (a presença de paredes e objetos obstruem o percurso de linha de vista do sinal emitido) e do desvanecimento multipercurso, que se deve aos diferentes caminhos que o sinal pode percorrer até chegar ao recetor, sofrendo reflexões, refrações e absorções, como por exemplo pelas pessoas em redor. Considerando estes efeitos, nos últimos anos tem sido efetuadas diversas experiências de modo a desenvolver algoritmos robustos, através da

medição da potência sinal em vários nós localizadores, que aumentem a precisão e exatidão da localização em espaço interior. [5][6][7]

2.4 Técnicas de Localização

Existem portanto, várias formas de obter informação para estimar a localização, representadas no diagrama da figura 2.3, quer a partir das medidas de sinal rádio recolhidas utilizando as técnicas referidas anteriormente, quer a partir de um sistema inercial que irá ser abordado num dos tópicos seguintes deste documento.

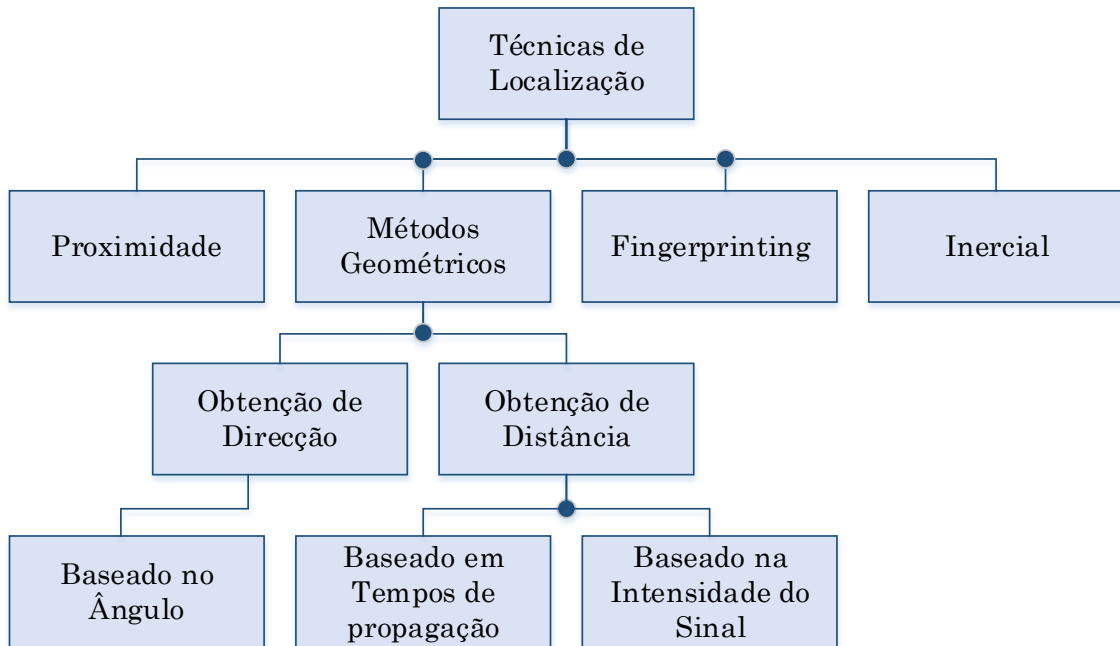


Figura 2.3: Diagrama das Técnicas de Localização.

2.4.1 Por proximidade

A localização é determinada de forma relativa baseada na deteção de proximidade com dispositivos cuja posição é conhecida *a priori*. Este método baseado em conectividade é, de facto, uma quantização da potência recebida, já que a troca de informação entre nós só é possível quando a potência é suficiente para que o sinal seja recebido pelo recetor.

De forma geral, os métodos de proximidade são limitados na sua precisão e alcance, baseados sobretudo em *hardware*, necessitando de uma densidade elevada de recetores (dispositivos de posição conhecida) por área de cobertura, o que resulta num custo elevado na implementação e manutenção do sistema. Assim, este método é usado apenas para detetar a proximidade dos nós móveis, podendo registar-se a passagem dos mesmos pelos nós localizadores. [5][6][7][8]

2.4.2 Métodos geométricos

A localização pode ser baseada nos ângulos de chegada dos sinais medidos nos nós fixos, como se observa na figura 2.4, na qual θ_1 e θ_2 representam os ângulos de chegada nos respectivos nós fixos (F), permitindo estimar a posição do nó móvel (M). Assim, através de medidas obtidas em dois nós fixos a partir do AoA é possível obter uma localização do alvo em 2D. Com o uso de 3 ou mais nós fixos é possível obter uma localização em 3D.

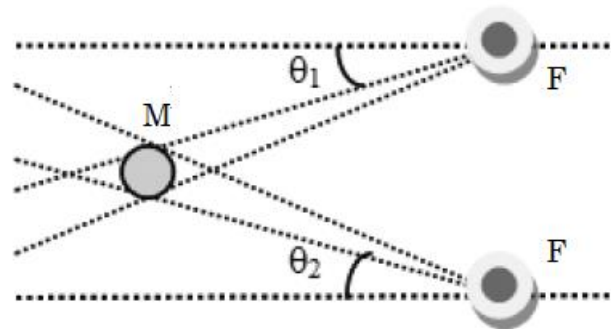


Figura 2.4: Representação da Técnica de Angulação. [8]

Estimando três ou mais medidas de distância entre os nós fixos (F) (ou localizadores) e o nó móvel (M), utilizando técnicas como o RSS, o ToA e o RTT, é possível, usando uma técnica designada *lateration*, determinar a localização do dispositivo móvel. No caso de serem usados apenas três nós fixos, como se observa na figura 2.5, esta técnica denomina-se de triangulação. Reunindo dados de mais nós fixos consegue-se maior precisão.

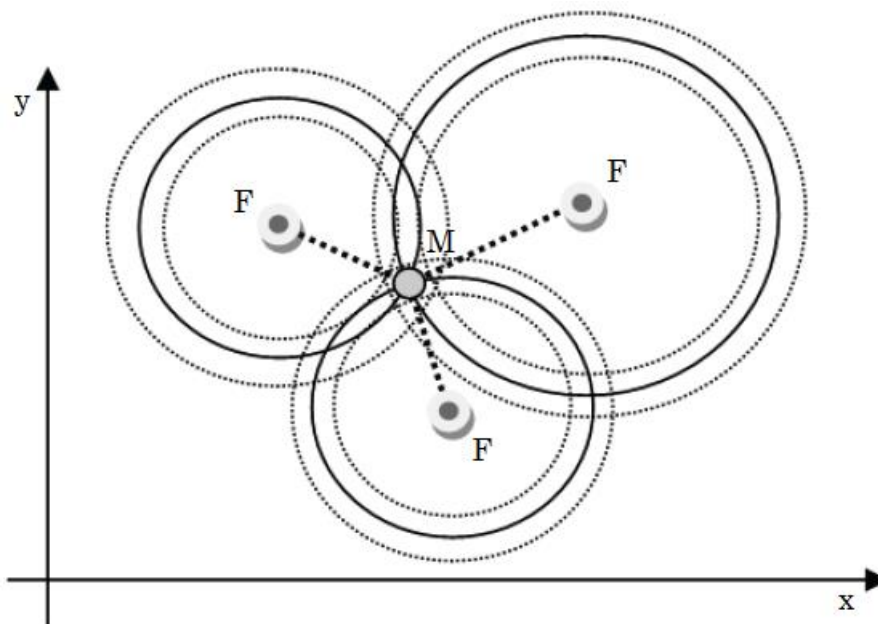


Figura 2.5: Ilustração da Triangulação baseada em distâncias. [8]

Outra metodologia prende-se com o uso de curvas hiperbólicas que podem ser desenhadas a partir da técnica de TDoA. Intersectando 3 ou mais hipérboles, como se pode observar na figura 2.6, obtém-se a localização 3D do nó móvel (M), sendo a precisão tanto maior quanto mais nós fixos (F) forem usados. [5][6][7][8]

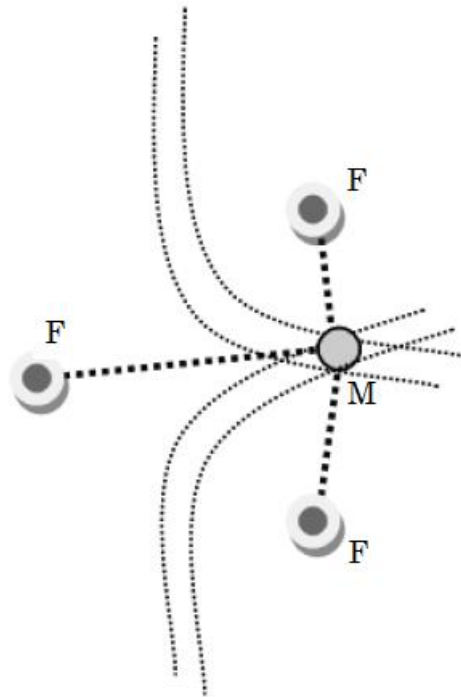


Figura 2.6: Representação da interseção de duas curvas hiperbólicas. [8]

2.4.3 Mapeamento

O método de mapeamento mais conhecido por *Fingerprinting* é uma estratégia de localização que é baseada na análise e mapeamento da área de cobertura, área delimitada ou edifício, onde o dispositivo móvel se pode encontrar. Este requer duas fases para a sua implementação, a fase *offline*, e a fase *online*. Na fase *offline* é efetuada a construção de um mapa de sinal, coletando impressões digitais (*fingerprints*), usualmente recorrendo a medições de potência de sinal rádio (*Received Signal Strength*, RSS) nos pontos de acesso (nós localizadores), que são feitas relativas a uma dada posição, capturando a influência das características do meio em redor na propagação dos sinais rádio. Este processo é repetido até que toda a área de cobertura seja mapeada, sendo estas informações posteriormente armazenadas numa base de dados. Em modo de funcionamento, isto é, na fase *online*, são efetuadas medidas de RSS em tempo real e comparadas com o padrão guardado anteriormente de modo a estimar a posição atual.

Apresentam uma precisão elevada, na determinação da localização relativamente aos métodos geométricos. Contudo, devido ao elevado número de medições e mapeamento na fase *offline* não é viável para grandes áreas de

cobertura pois é um processo lento que requer o auxílio de recursos humanos. Para além disso, são sistemas que não têm capacidade de adaptabilidade, isto é, sempre que se quer efetuar a localização num espaço diferente é necessário efetuar um mapeamento da área onde se pretende localizar o móvel. [1][5][6][7]

2.4.4 Inercial

É um processo de localização, que estima a posição atual com base na anterior, sendo designado por navegação estimada. Utilizando um sistema inercial, provido de um acelerómetro e giroscópio, é possível determinar a deslocação, sentido e direção do dispositivo móvel face ao estado anterior. No entanto, tem a desvantagem de que, ao longo do tempo, o desvio em relação à posição real vai crescendo pois o erro é cumulativo. Para além disso, é necessário um ponto de referência/partida para iniciar a localização. Usualmente são usados vários nós localizadores de referência, cuja posição absoluta é conhecida previamente, que permitem o ajuste da localização, minimizando o efeito do erro. [6]

2.5 Tecnologias Rádio Frequência usadas nos sistemas de localização

De seguida, é feita uma apresentação das tecnologias rádio frequência em que se baseiam os sistemas de localização. No último tópico é realizada uma comparação entre ambas considerando parâmetros importantes na avaliação de um sistema de localização.

2.5.1 *Radio Frequency Identification* (RFID)

A RFID é uma tecnologia baseada na proximidade que permite a troca de dados através da transmissão de ondas de rádio frequência. Utilizando uma etiqueta, um dispositivo com uma antena integrada, e um leitor, um dispositivo com uma ou mais antenas que recebe os sinais rádio e os disponibiliza para a camada de aplicação, é possível estabelecer um canal de comunicação.

De modo geral existem etiquetas passivas e ativas. As etiquetas passivas são leves, pequenas, de baixo custo e tempo longo de vida, não possuindo bateria e geralmente sem um transceptor (transmissor e recetor). Deste modo só entram em funcionamento quando o campo eletromagnético gerado pelo leitor, que é adquirido pela sua antena, é suficiente para as ativar. Operam portanto, apenas quando recebem a energia necessária para estabelecer comunicação, que é proveniente da onda eletromagnética incidente do leitor (técnica designada de retroespalhamento). As etiquetas ativas tem custos mais elevados pois tem integrado um transceptor de sinal e são providas de fonte de

energia própria, usualmente uma bateria. Por isso, podem estar ativas independentemente da localização do leitor, permitindo uma comunicação de maior alcance, sendo por isso usadas em sistemas de localização.

As etiquetas ativas usadas para localização são designadas de *beacons*, emitindo um sinal com um identificador único em intervalos de tempo pré-definidos. Utilizando a técnica geométrica triangulação de curvas hiperbólicas baseadas no TDoA, estima-se o posicionamento do móvel.

O RFID pode usar 4 bandas de frequências: LF (125KHz - 134,2KHz), HF (13,56MHz), UHF (433MHz, 860MHz - 960MHz) e SHF (2,45GHz, 5,6GHz). [4][9][10]

2.5.2 Bluetooth

O Bluetooth é uma tecnologia sem fios utilizada em redes domésticas (WPAN, *Wireless Personal Area Networks*) pois é barata, de pequenas dimensões e baixo custo. Opera dos 2,4GHz até aos 2,485GHz, proporcionando 79 canais, permitindo a comunicação de dispositivos a pequena e média distância, classificados em classe 1, 2 e 3, considerando a potência do transmissor. Com o uso em classe 1 de potência, é possível um alcance até 100m e em classe 2 e 3, de 10m e 1m respetivamente.

Recentemente foi criado o Bluetooth *smart* ou BLE (*Bluetooth Low Energy*), de baixo consumo, com vista em maximizar a eficiência de pequenas transferências de dados, como por exemplo para recolher valores medidos por sensores.

Atualmente vem incorporado em dispositivos que um vasto número de cidadãos tem ao seu dispor, nomeadamente *smartphones* e *tablets*, sendo por isso uma via disponível para a conceção de sistemas de rastreamento e localização. A tecnologia em análise é usada para implementação de sistemas de localização em espaços interiores recorrendo a técnicas de proximidade ou de triangulação da intensidade do sinal (RSS), apresentando, no entanto, uma latência elevada para localização em tempo real. Para além disso, para uma precisão adequada em espaço interior, inferior a 1m, é necessário um uso elevado de nós localizadores, tornando o sistema complexo e de custo elevado já necessita de vários equipamentos/dispositivos por unidade de área. [4][11]

2.5.3 Wireless Local Area Network (WLAN)

WLAN (IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 802.11) significa rede local sem fios, operando às frequências de 2,4GHz e 5GHz na Europa, é uma solução de baixo custo para localização e rastreamento, já que existe em várias infraestruturas públicas, como em hospitais, aeroportos, campos universitários, empresas e centros comerciais e até em redes domésticas.

Métodos geométricos, de mapeamento e de um modo mais geral, o RSS, são usados com base no sinal de WLAN recebido nos nós localizadores para estimar o posicionamento do alvo.

O seu alcance é razoável para aplicações indoor (50m - 100m), no entanto, a precisão atingida é um pouco grosseira (1 - 5m) pois a propagação do sinal rádio é afetada pelas condições em redor, como por exemplo pelo movimento e orientação de pessoas, pelas paredes e portas. Para além disso, existem diversos dispositivos a operar à frequência de 2,4GHz, *smartphones* ou os portáteis, que geram interferência tornando a receção e tratamento do sinal complexa. [4][5][7]

2.5.4 ZigBee

O *ZigBee* é uma tecnologia sem fios de baixo custo que permite a comunicação máquina a máquina a pequenas e médias distâncias, sendo criado para aplicações de baixo débito de dados, que requerem baixo consumo. Opera segundo a norma IEEE 802.15.4 e nas bandas de frequências 868MHz - 900MHz e 2,4GHz na Europa.

Esta tecnologia suporta a configuração em malha de rede, que revelou-se inovadora, pois todos os nós da rede estão conectados entre eles e as suas ligações são atualizadas dinamicamente e otimizadas segundo uma tabela de *routing*. Assim, cada nó é capaz de se descobrir na rede, mesmo que haja falhas de ligação, e alguns nós fiquem desconectados, a malha de rede descentralizada permite que os nós reconfigurem as suas rotas garantindo grande estabilidade do sistema.

Para localização em espaços interiores esta tecnologia é usada com base em RSS e o seu alcance é viável, de cerca de 20 - 30m. No entanto o erro de localização, de 3m a 5m, é algo elevado para este tipo de aplicação, para além de ser necessário um número elevado de nós localizadores por unidade de área para atenuar os efeitos multipercurso em espaço interior. [4][12]

2.5.5 Ultra Wideband (UWB)

O UWB, banda ultra larga, é uma tecnologia para comunicação a curtas distâncias, de baixo consumo e elevada largura de banda. Os sinais de UWB tem as particularidades de serem menos vulneráveis aos efeitos de multipercurso e permitirem um bom desempenho em ambientes ruidosos (na presença de outros dispositivos a emitir ondas rádio frequência).

Esta tecnologia é baseada no envio de pulsos, oscilações eletromagnéticas de alta frequência, ultra estreitos no domínio do tempo (<1 nano-segundo), com um *duty cycle* baixo, designados de UWB-IR (*Ultra Wideband Impulse Radio*), usando uma banda de frequências compreendida entre 3,1GHz e 10,6GHz, para aplicações de comunicação e localização.

Consegue-se, utilizando esta tecnologia, uma localização de alta precisão, na ordem dos centímetros, triangulando as distâncias estimadas através da

utilização de técnicas de medição de tempos de propagação (ToA, TDoA, RTT), com um alcance ótimo para edifícios e espaços interiores, e razoável para exteriores.

Por outro lado, a propagação parcial em alguns materiais, causa dispersão, existindo múltiplos sinais de retorno em sobreposição, exigindo recetores adequados para adquirir e decodificar os sinais UWB. [4][7][13]

2.5.6 Comparação das Tecnologias Radio Frequência

A partir de [6] construiu-se a tabela 2.1, que apresenta uma comparação das tecnologias abordadas nos tópicos anteriores, avaliando alguns parâmetros de desempenho que são usados para análise dos sistemas de localização.

Tabela 2.1: Tecnologias de rádio frequência.

Sistema	Consumo Energético	Efeito multi-percurso	Alcance (m)	Precisão	Custo
RFID	Baixo	Alto	30 - 100	1m - 2m	Baixo
Bluetooth	Baixo	Alto	10 - 100	2m - 5m	Médio
WLAN	Alto	Alto	50 - 100	1m - 5m	Baixo
ZigBee	Baixo	Alto	20 - 30	3m - 5m	Médio
UWB	Baixo	Baixo	30 - 290	10cm - 30cm	Médio

Ao analisar a tabela verifica-se que a tecnologia WLAN é a aquela que apresenta um maior consumo de energia e que a tecnologia ZigBee possui um alcance mais reduzido. Todas as tecnologias baseadas em RF podem ser adquiridas entre médio e baixo custo. Constata-se também, que a tecnologia UWB, ao contrário das restantes, manifesta maior resistência aos efeitos multipercurso, sendo a única que permite atingir uma precisão inferior a 1m em espaço interior. Considerando esta análise, a Micro IO apoiou a utilização desta tecnologia para a implementação do sistema de localização.

2.6 Sistemas de localização Híbridos

Os sistemas de localização híbridos são baseados numa combinação de duas ou mais técnicas e/ou tecnologias de localização que foram referidas anteriormente. Consegue-se uma melhor precisão na localização dos nós móveis ao adquirir diferentes tipos de informação. Contudo, o tempo de processamento destes sistemas em relação aos sistemas mais simples (que usam apenas uma técnica aliada a uma tecnologia) é maior, e por conseguinte, possuem geralmente uma latência pouco apropriada para aplicações RTLS. Nos sistemas híbridos usam-se frequentemente recursos já existentes na área de cobertura onde o serviço de localização se pretende funcional. A título de

exemplo, em edifícios dotados de alguns pontos de acesso (APs), pode-se implementar um sistema de localização, recorrendo a um sistema inercial aliado à técnica de proximidade. Sabendo previamente a posição absoluta dos pontos de acesso no espaço interior consegue-se recalibrar sucessivamente o sistema pela potência do sinal emitida pelos mesmos, minimizando o erro cumulativo na posição estimada que se verifica num simples sistema inercial. [6][7]

2.7 Produtos de mercado

Na tabela 2.2 pode verificar-se a precisão e o alcance de alguns produtos/protótipos desenvolvidos por empresas que se dedicam à investigação e implementação de sistemas de localização para espaço interior baseados na UWB, a tecnologia que apresenta um melhor desempenho no âmbito dos sistemas RTLS.

Tabela 2.2: Sistemas de localização baseados em UWB.

Produto/ Empresas	Precisão (cm)	Alcance (m)
Decawave [14]	10	300 LOS
Redpoint Positioning [15]	20	50 LOS
OpenRTLS (baseado no transceptor Decawave) [16]	10	>300 LOS / ~30 NLOS
Eliko [17]	30	>100 LOS
Sewio (baseado no transceptor Decawave) [18]	30	>50 LOS
Time Domain [19]	2	~354 LOS/ ~30 NLOS
Zebra Technologies [20]	30	200 LOS
Ubisense [21]	15	>50LOS
Bespoon[22]	10	880LOS

Ao analisar a tabela verifica-se que todos os sistemas baseados na tecnologia UWB apresentam uma precisão igual ou inferior a 30cm, valores que são válidos para espaços LOS, Line of Sight (linha de vista). O alcance dos sistemas representados na tabela são adequados para locais LOS. Para locais NLOS, Non Line of Sight (sem linha de vista) existe uma relação inversa entre a precisão e o alcance, ou seja, é necessário uma maior proximidade entre os nós fixos para obter a mesma precisão que se verifica em linha de vista.

A maior parte das empresas apenas tem em sua posse protótipos e *kits* de avaliação não fornecendo, por exemplo, informações sobre dimensões, peso e autonomia dos dispositivos móveis. O custo deste tipo de produtos pode ir desde os 500€ até próximo dos 10000€ dependendo do número de dispositivos móveis e fixos, bem como a inclusão ou não de um contrato de assistência técnica. Portanto, não é feita uma comparação de outras características que permitem avaliar o desempenho dos sistemas de localização.

2.8 Sumário

Neste capítulo elaborou-se um estudo sobre métricas consideradas na avaliação do desempenho de um sistema de localização.

São várias as técnicas e tecnologias que servem de base num sistema de localização, considerando a investigação realizada.

A tecnologia UWB é aquela que apresenta um melhor desempenho para localização em espaços interiores, considerando a comparação efetuada com as outras tecnologias baseadas em rádio frequência. Por conseguinte, desenvolveu-se uma pesquisa de mercado relativa aos sistemas de localização baseados na tecnologia já citada.

3. Tecnologia adotada e conceitos relevantes

No capítulo anterior foram descritas as várias tecnologias usadas na conceção de sistemas RTLS em espaços interiores, verificando-se que a tecnologia UWB apresenta características vantajosas para este tipo de aplicação, distinguindo-se das restantes.

Assim, no presente capítulo a tecnologia UWB será descrita de forma mais elaborada, além de serem mencionados de forma breve o circuito integrado UWB, bem como métrica de sinal rádio adotados para o desenvolvimento do sistema proposto, discutindo-se conceitos úteis para a sua compreensão.

3.1 Tecnologia UWB

Na presente subsecção é feita uma abordagem mais detalhada à tecnologia UWB baseada em [23], descrevendo-se também a norma 802.15.4 relativa à tecnologia adotada e as limitações das emissões UWB impostas pelas entidades reguladoras Europeias.

3.1.1 Conceitos

Os sistemas de comunicações tradicionais de banda estreita modulam sinais através de uma portadora, um sinal com uma frequência específica, para receber e transmitir informação. Assim, estes sinais são vulneráveis a interceção e deteção, por apresentarem a sua energia concentrada numa banda estreita em frequência, tal como se observa na figura 3.1.

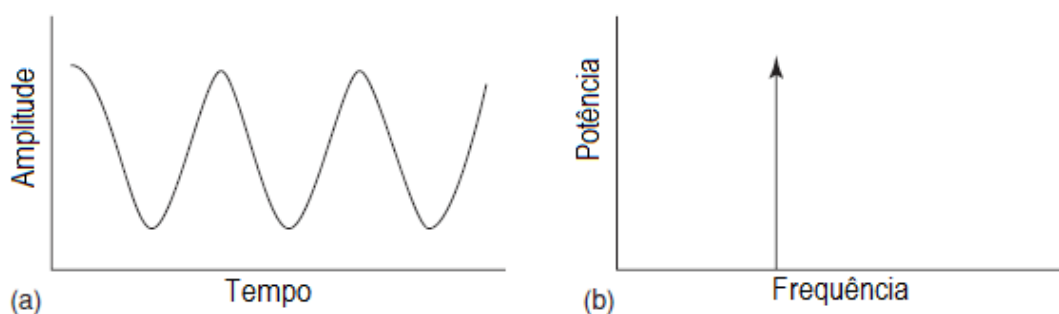


Figura 3.1: Sinal de banda estreita em (a) no domínio de tempo e em (b) no domínio da frequência.

Por outro lado, os sistemas UWB fazem uso de pulsos rádio frequência de curta duração em tempo (na ordem dos pico segundos até aos nano segundos) para comunicação. Estes pulsos apresentam um *duty cycle* (ciclo de

funcionamento) muito baixo (0.5%), isto é, a percentagem de um período que o sinal está ativo é bastante reduzida, tal como se pode observar de forma conceptual na figura 3.2 em que T_{on} , representa o tempo ativo e T_{off} representa o tempo inativo.

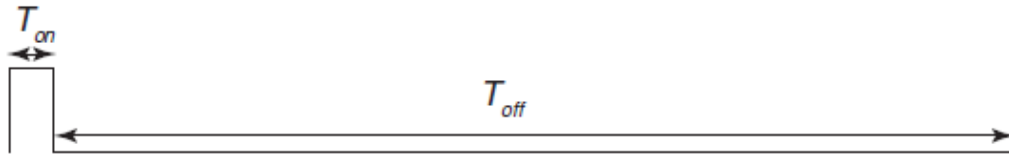


Figura 3.2: *Duty cycle* de um pulso UWB.

Os sistemas de comunicação UWB apresentam um *duty cycle* baixo que permite que a potência média de transmissão seja baixa, na ordem dos μW , que representa uma ordem de grandeza mil vezes inferior a potência de transmissão de um telemóvel. Neste contexto, os dispositivos UWB são considerados de baixa potência.

O domínio de frequência é inversamente relacionado com o domínio do tempo, portanto, os pulsos UWB “espalham” a sua energia numa vasta gama de frequências, desde perto de 0 até alguns GHz (10GHz), apresentando uma densidade espectral de potência baixa que se pode verificar de forma conceptual na figura 3.3.

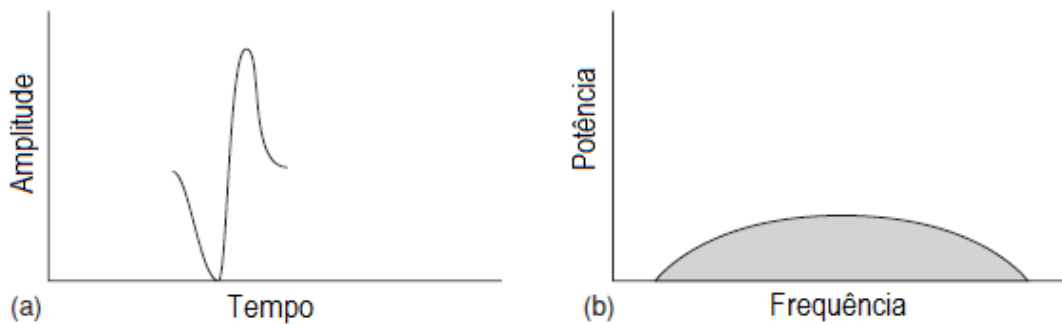


Figura 3.3 Sinal UWB em (a) no domínio de tempo e em (b) no domínio da frequência.

3.1.2 Largura de Banda

A largura de banda fracionária, B_f , é um fator definido pela FCC (*Federal Communications Commission*) para classificar os sinais como *narrowband* (banda estreita), *wideband* (banda larga) e UWB (banda ultra larga).

Este parâmetro pode ser calculado utilizando a seguinte expressão:

$$B_f = \frac{2(f_a - f_b)}{f_a + f_b} \times 100\%$$

em que f_a (alta frequência) e f_b (baixa frequência) são as frequências correspondentes, respectivamente ao extremo superior e inferior da largura de banda absoluta.

Assim, para que um sinal seja considerado UWB, este tem de verificar uma largura de banda fracionária superior a 20% durante todo o tempo das comunicações, que corresponde a um uso de uma largura de banda superior a 500MHz.

3.1.3 Vantagens

O uso de pulsos de curta duração em sistemas UWB resulta em várias vantagens comparativamente com os sistemas de comunicação alternativos de banda estreita. Neste tópico serão discutidas de forma breve os pontos fortes da tecnologia UWB.

A restrição de potência imposta pela FCC de -41dBm/MHz , que corresponde a 75Watts/MHz , coloca os sistemas UWB abaixo do ruído dos recetores de banda estreita, permitindo aos sinais UWB coexistirem com os serviços correntes de RF através de uma interferência mínima, ou sem interferência. Na figura 3.4 observa-se a ocupação do espectro pelos diferentes tipos de sinais: banda estreita, banda larga e banda ultra larga (UWB).

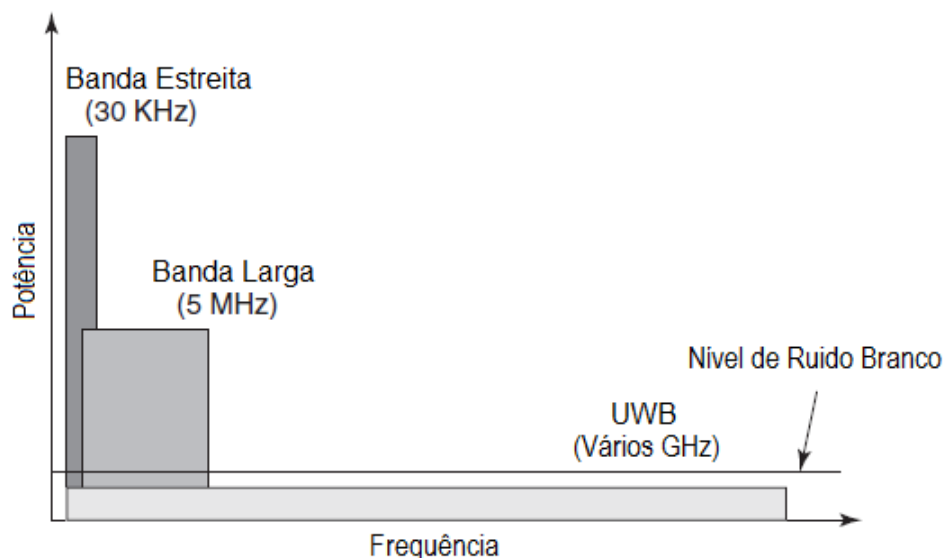


Figura 3.4: Densidade espectral de potência dos sinais UWB, de banda estreita e banda larga.

A interferência com outros dispositivos que partilham o espectro depende do esquema modulação usado, que em certos casos pode originar o aparecimento de riscas discretas indesejadas no domínio de frequência, podendo aumentar a interferência para com outros sistemas RF, bem como a vulnerabilidade do sistema UWB perante a interferência de outros dispositivos RF.

Uma das maiores vantagens de uma largura de banda elevada dos sinais UWB é o aumento da capacidade do canal. A capacidade do canal, C , ou taxa de dados, é definida pela máxima quantidade de informação que pode ser transmitida por segundo no canal de comunicação. A maior capacidade de um canal UWB é comprovada pela fórmula de Hartley-Shannon:

$$C = B \log_2(1 + \text{SNR})$$

na qual B representa a largura de banda e SNR a relação sinal-ruído.

Pela fórmula de Hartley-Shannon, também se verifica que a capacidade do canal apenas é logaritmicamente dependente da relação sinal-ruído e por isso os sistemas UWB são capazes de funcionar em condições desfavoráveis (SNRs baixos) e mesmo assim, possibilitarem uma capacidade de canal elevada devido a sua elevada largura de banda.

Pelo facto da potência dos sinais estar distribuída pelo espectro, as comunicações UWB tem uma probabilidade reduzida de serem detetadas ou interceptadas. Para além disso, a modulação em pulsos extremamente estreitos no domínio do tempo, dificulta ainda mais qualquer intrusão que possa danificar informação, dado que a deteção de pulsos sem saber quando serão emitidos é improvável.

Ao contrário dos sistemas de banda estreita, que operam a uma frequência bem definida no espectro, os sistemas UWB estendem-se por uma vasta gama de frequências.

O ganho de processo, PG, mede a resistência de um sistema RF ao *jamming*, que é termo que se atribui quando são colocados, intencionalmente, dispositivos a emitir sinais RF com o objetivo de provocar interferência em determinadas frequências, impossibilitando outros dispositivos nas proximidades de realizarem comunicações. O ganho de processo é dado através da razão da largura de banda RF pela informação emitida nessa mesma largura de banda.

Portanto, pela diversidade de frequências, pode-se constatar que os sistemas tem um ganho de processo superior aos alternativos sistemas de banda estreita e por isso apresentam uma resistência maior ao *jamming*.

O fenómeno conhecido por multipercurso é resultante de reflexões, a que o sinal transmitido está sujeito, pela presença de obstáculos no meio de propagação, como paredes, portas, pessoas, entre outros. O efeito multipercurso sentido pelos sinais UWB é mais baixo quando comparado com sinais de banda estreita, dado que a transmissão pela modulação em pulsos estreitos no domínio do tempo reduz probabilidade de ocorrerem colisões entre os pulsos LOS (*Line Of Sight*, em linha de vista) com os pulsos NLOS (*Non Line Of Sight*, sem linha de vista), provocando a degradação do sinal adquirido nos recetores.

A figura 3.5 mostra o impacto do fenómeno de multipercurso nos sinais de banda estreita em comparação com os sinais UWB, dado que nos sistemas banda a soma das componentes LOS e NLOS pode resultar num sinal atenuado, ou até mesmo nulo, no caso de se cancelarem.

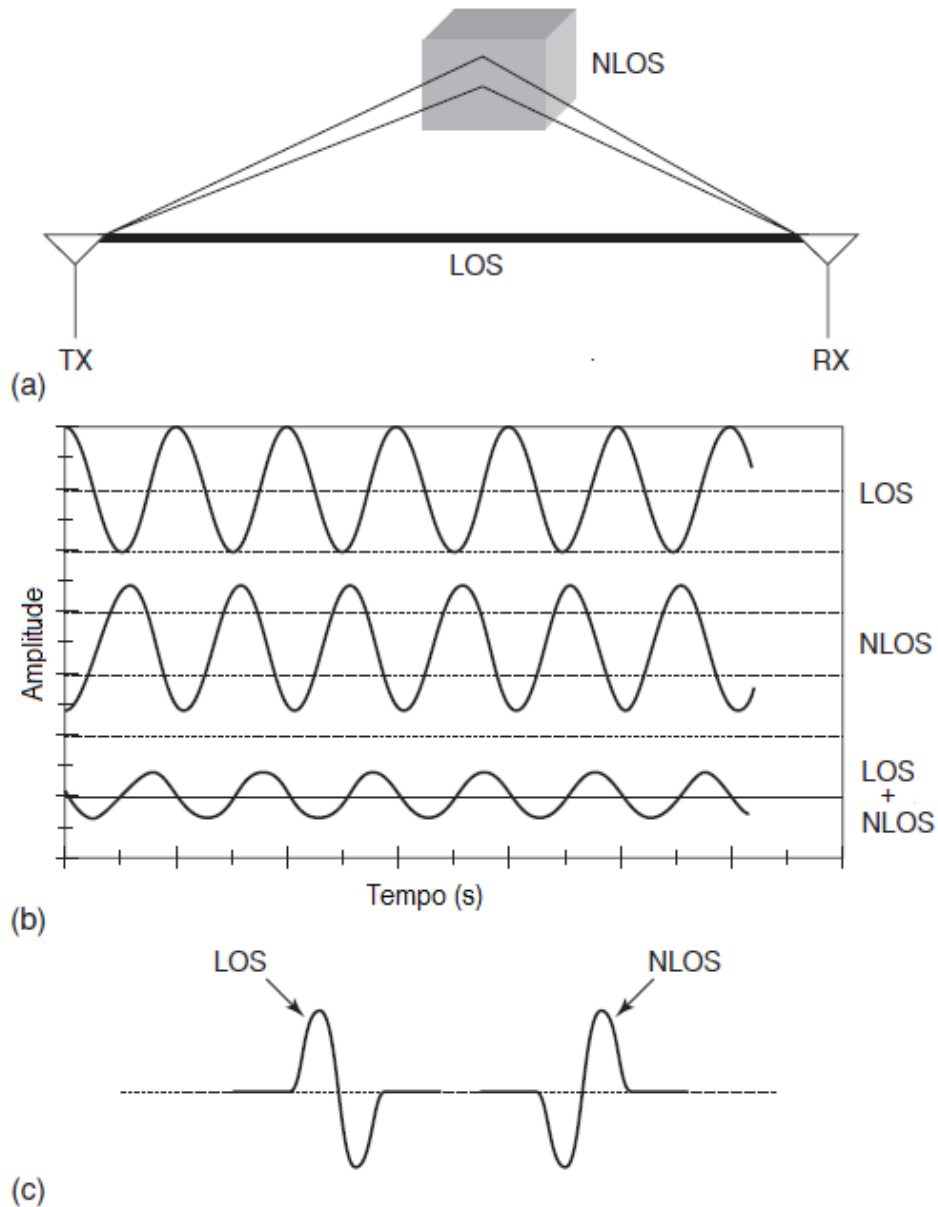


Figura 3.5: Fenómeno de multipercurso em (a), os efeitos multipercurso nos sinais de banda estreita em (b) e os efeitos multipercurso nos sinais UWB em (c).

Os sinais UWB têm a capacidade de passar através de materiais, incluindo paredes, sobretudo às frequências mais baixas para as quais o comprimento de onda é maior do que as dimensões dos materiais que atravessa. Isto verifica-se porque comprimento de onda, dado pela razão entre a velocidade da luz e a frequência dos sinais propagados no meio (c/f), para os sinais UWB pode variar

de poucos centímetros (para uma frequência de 10GHz) até a algumas dezenas de centímetros (para uma frequência de 3GHz).

Os transmissores dos sistemas UWB são mais simples do que aqueles que são usados nos sistemas de banda estreita, nos quais a informação é modulada para alta frequência através de uma onda contínua e a uma frequência específica, designada de portadora.

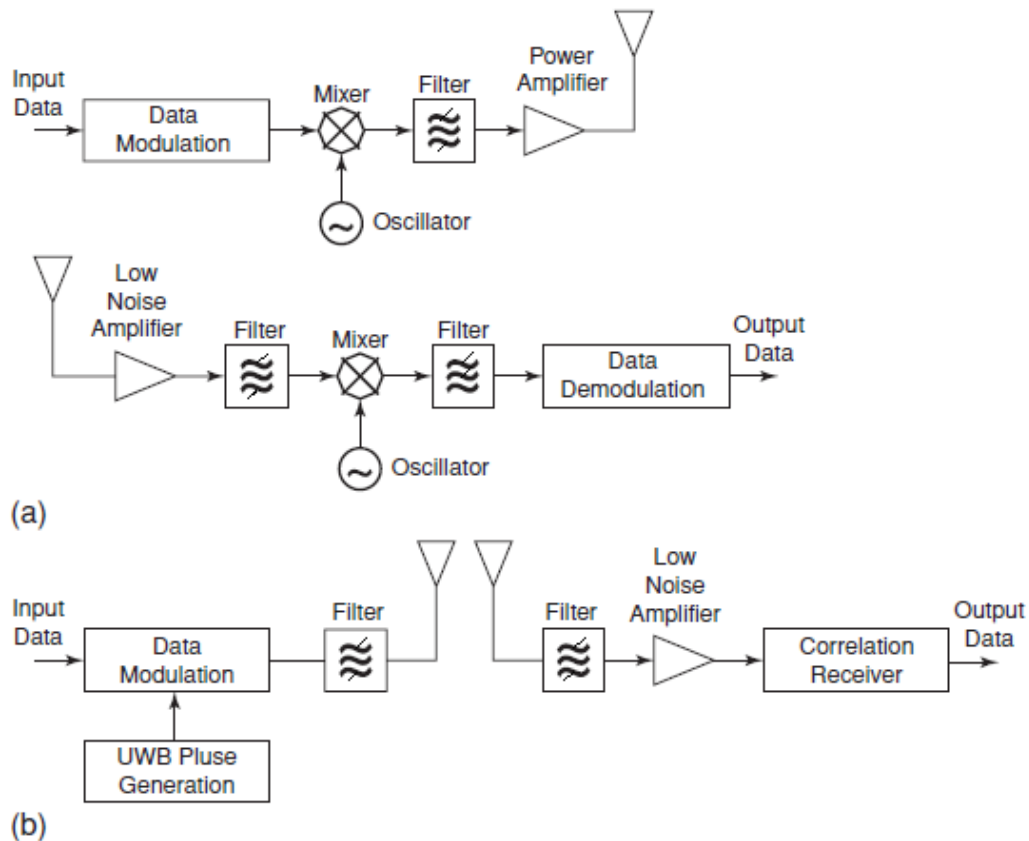


Figura 3.6: Arquitetura dos transmissores e receptores de sinais de banda estreita em (a) e de sinais UWB em (b).

A partir da figura 3.6 percebe-se que os transmissores UWB não necessitam de um amplificador de potência de saída (*power amplifier*). A componente analógica do transmissor e receptor dos sistemas UWB é também mais simples, notando-se na figura 3.6, a ausência de um misturador (*mixer*) e de um oscilador local (*oscillator*). O bloco *Data Modulation* é relativo à modulação da informação em amplitude, fase ou frequência para os sistemas de banda estreita e modulação em pulsos para sistemas UWB. O bloco de *Data Demodulation* corresponde ao circuito de decisão determinando o nível lógico (0 e 1) das tramas de informação recebidas. Nos sistemas UWB o bloco de *Correlation Receiver* faz a correlação dos sinais recebidos (diversos pulsos no domínio do tempo) que ocupam uma gama igual ou superior a 500MHz.

De seguida apresenta-se uma tabela de resumo (tabela 3.1) das características da tecnologia UWB que são mais-valias no desempenho dos sistemas UWB.

Tabela 3.1: Vantagens da tecnologia UWB.

Características	Vantagens
Capacidade de partilha de espectro.	Evita que seja necessário adquirir licenças de elevado custo.
Elevada capacidade do canal.	Suporta comunicações de alto débito de dados como por exemplo a transmissão de vídeo de alta definição em tempo real.
Elevado desempenho com uma relação sinal ruído reduzida.	Permite um bom desempenho em ambientes ruidosos.
Potência de transmissão dispersa no espectro de frequências (numa gama mínima de 500MHz).	Proporciona um nível elevado de segurança com uma probabilidade reduzida de deteção e interceção.
Resistência ao <i>jamming</i> .	Razoável desempenho em meios hostis.
Alto desempenho em canais de multipercurso.	Proporciona uma amplitude de sinal satisfatória em ambientes NLOS, que é adquirida e decodificada corretamente no sistema designado à receção.
Arquitetura simples do transmissor.	Resulta num sistema de baixo custo e baixa potência.

3.1.4 Desvantagens

Por outro lado, a tecnologia UWB também apresenta alguns desafios devido à comunicação através do uso de pulsos ultra estreitos no domínio do tempo. Assim, serão descritas nesta subsecção algumas desvantagens da tecnologia.

Os sinais de baixa potência UWB são suscetíveis a uma maior distorção quando comparando com os sistemas de banda estreita. Pode-se comprovar esta premissa matematicamente pela usual fórmula de Friis, que se apresenta de seguida:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{c}{4\pi d f} \right)^2$$

na qual P_r e P_t são as potências do sinal recebido e transmitido, respetivamente; G_r e G_t são os ganhos das antenas do recetor e do transmissor, respetivamente; c é a velocidade da luz; d é a distância entre o transmissor e o recetor; e f é a frequência do sinal.

Analisando a fórmula de Friis, percebe-se o que a potência do sinal recebido decresce quadraticamente com o aumento da frequência.

É difícil caracterizar o meio de transmissão, de forma a reconhecer o sinal modelo a que corresponde o sinal adquirido. Para isso, são usadas sequências de “treino” para estimar parâmetros do canal, tal como atenuação e atrasos de propagação. No entanto, como consequência da distribuição de energia no espectro, os pulsos UWB são suscetíveis a distorção, e por isso, é difícil fazer uma estimativa aproximada das características do canal de comunicação relativo aos sistemas UWB.

A amostragem e sincronização de pulsos de ordem inferior a alguns nano segundos são inconvenientes para no projeto de sistemas UWB, pois são necessários ADCs (*Analog to Digital Converters*, conversores analógico-digital) com uma velocidade na ordem dos *Gigahertz*. As limitações de potência e duração curta dos pulsos UWB também tornam os sistemas UWB sensíveis a desvios na frequência nos sinais de relógio dos dispositivos que realizam a transmissão e recepção dos sinais.

Num sistema de multiutilizador, diferentes utilizadores e dispositivos transmitem informação de forma independente e acedendo simultaneamente ao meio de comunicação partilhado. Assim, na receção, um ou mais recetores são responsáveis por separar os utilizadores e detetar a informação de forma correta e correspondente a cada um. Neste contexto, a interferência de outros utilizadores com o utilizador considerado, designado de interferência de múltiplo acesso, é um fator que limita a capacidade do canal e o desempenho dos recetores UWB.

Na tabela 3.2, apresenta-se um resumo das características da tecnologia UWB que são desvantajosas para o desempenho dos sistemas UWB.

Tabela 3.2: Desvantagens da tecnologia UWB.

Características	Desvantagens
Distorção de pulsos.	Baixo desempenho usando os filtros de correlação clássicos.
Resposta do canal.	Dificuldade em prever um sinal modelo.
Sincronização a alta frequência.	Necessidade de ADCs de alta velocidade.
Interferência de múltiplo acesso.	A separação da informação relativa aos diversos utilizadores é mais complicada que nas comunicações de banda estreita.

3.1.5 Norma IEEE 802.15.4

A IEEE 802.15.4a, uma emenda introduzida em 2007, foi a primeira norma que adicionou suporte para UWB com base na IEEE 802.15.4 (2006) sendo descrita nesta secção com base em [24], [25] e [26]. Esta é uma norma desenvolvida para redes WPAN de baixo custo que permitem a conectividade de aplicações com energia limitada e taxas de transmissão de dados moderadas, LR-WPAN (*Low-Rate Wireless Area Network*), sendo atualizada em 2011 pelo IEEE-SA (*Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards Association*).

A estrutura da trama de UWB consiste em 3 campos distintos: SHR (*Synchronization Header Preamble*), cabeçalho de sincronização, PHR (*Physical Header*), cabeçalho físico, e *Data Field*, dados, que corresponde ao campo do pacote que efetivamente contém a informação útil a ser transmitida, como se observa na figura 3.7.

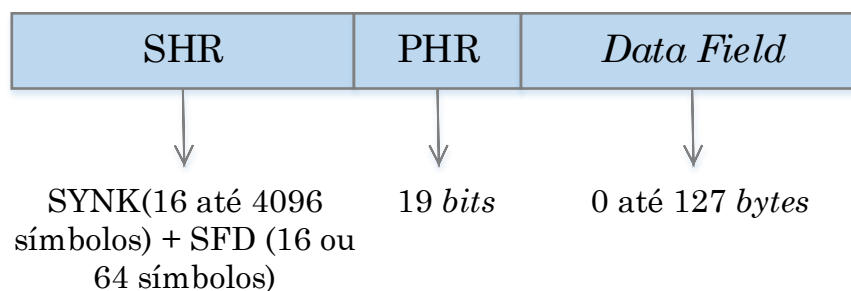


Figura 3.7: Estrutura da trama UWB segundo a norma 802.15.4.

Cabeçalho de sincronização

O cabeçalho de sincronização é composto por 2 campos: SYNC e SFD. O campo de SYNC (*Synchronization*), consiste num código de preâmbulo, formando uma sequência de símbolos pseudo-aleatória periódica conhecida *a priori*, que apresenta um deslocamento cíclico (autocorrelação periódica), permitindo sincronizar o recetor da trama. Cada código de preâmbulo é uma sequência de um alfabeto ternário (-1,0,1) com um tamanho de 31 ou 127 caracteres do alfabeto que formam um símbolo. Assim o campo de SYNC consiste numa repetição de 16, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048 ou 4096 símbolos. Para cada banda de frequência, um número de códigos com uma mínima autocorrelação são escolhidos, permitindo vários dispositivos operarem à mesma frequência (multi-acesso).

O campo SFD (*Start of Frame Delimiter*), que significa delimitador de início de trama, que consiste sequência de 8 ou 64 símbolos sinalizando ao recetor que o código de preâmbulo chegou ao fim.

Cabeçalho físico

Este campo serve para que o pacote seja decifrado com sucesso no recetor, contendo informação sobre a taxa de transferência de dados usada para transmitir no campo de dados (Data Field), a duração da sequência de preâmbulo da presente trama e o tamanho do campo de dados, incluindo também 6 *bits* de paridade para proteger este campo face a erros proporcionados pelo canal de comunicação.

Dados

Corresponde à parte do pacote que contém, efetivamente, a informação útil a transmitir, cujo tamanho pode ser definido pelo utilizador, podendo ser também sujeito a encriptação.

Canais

A camada física da norma IEEE 802.15.4 que é referente ao UWB suporta 3 bandas de frequências:

- Banda *Sub-gigahertz*, que consiste num único canal entre os 249,6MHz até aos 749,6MHz;
- Banda baixa, que se traduz em 4 canais na gama entre 3,1GHz até 4,8GHz;
- Banda alta, que consiste em 11 canais na gama entre 6GHz e 10,6GHz.

A norma IEEE802.15.4 tem suporte específico para aplicações que requerem medições de alta precisão. É usada uma combinação de duas técnicas de modulação, BPM (*Burst Position Modulation*) e BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), para modular os símbolos (das tramas a transmitir), compostos por uma quantidade variável de pulsos UWB, permitindo 4 taxas diferentes de transmissão: 110Kbps, 850Kbps, 6,8Mbps e 27Mbps.

3.1.6 Regulamentos e limites de emissão impostos

A Comissão Europeia definiu uma norma sobre a utilização do espectro radioelétrico para equipamentos que usam a tecnologia UWB [27]. No respetivo documento é mencionado o seguinte: “A decisão assegura que o espectro radioelétrico estará disponível em condições harmonizadas em toda a União, elimina os obstáculos à adesão à tecnologia UWB e cria um mercado único efetivo para os sistemas UWB, com significativas economias de escala e benefícios para o consumidor”, “As rápidas mudanças na tecnologia e na utilização do espectro radioelétrico devem estar devidamente refletidas na regulamentação da tecnologia UWB, para que a sociedade europeia possa beneficiar da introdução de aplicações inovadoras assentes nesta tecnologia,

garantindo-se simultaneamente que os outros utilizadores do espectro não sejam afetados negativamente” e “clarificou as condições técnicas em que é possível utilizar técnicas de mitigação específicas para permitir que os equipamentos UWB funcionem com potências de emissão mais elevadas, oferecendo ao mesmo tempo uma proteção equivalente à proporcionada pelos limites atuais da UWB na sua utilização genérica, pelos veículos automóveis e ferroviários e por equipamentos de localização.”

Apresenta-se de seguida uma tabela, que se pode encontrar no anexo ao documento relativo à norma que já foi referida, alusiva às limitações de potência que os equipamentos UWB devem respeitar em cada gama de frequências.

Tabela 3.3: Requisitos técnicos da tecnologia UWB. [27]

Faixa de frequências	Densidade espectral máxima de potência média (p.i.r.e.)	Potência de pico máxima (p.i.r.e.) (definida em 50 MHz)
$f \leq 1,6$ GHz	- 90 dBm/MHz	- 50 dBm
$1,6 < f \leq 2,7$ GHz	- 85 dBm/MHz	- 45 dBm
$2,7 < f \leq 3,1$ GHz	- 70 dBm/MHz	- 36 dBm
$3,1 < f \leq 3,4$ GHz	- 70 dBm/MHz ou - 41,3 dBm/MHz utilizando LDC ⁽¹⁾ ou DAA ⁽²⁾	- 36 dBm ou 0 dBm
$3,4 < f \leq 3,8$ GHz	- 80 dBm/MHz ou - 41,3 dBm/MHz utilizando LDC ⁽¹⁾ ou DAA ⁽²⁾	- 40 dBm ou 0 dBm
$3,8 < f \leq 4,8$ GHz	- 70 dBm/MHz ou - 41,3 dBm/MHz utilizando LDC ⁽¹⁾ ou DAA ⁽²⁾	- 30 dBm ou 0 dBm
$4,8 < f \leq 6$ GHz	- 70 dBm/MHz	- 30 dBm
$6 < f \leq 8,5$ GHz	- 41,3 dBm/MHz	0 dBm
$8,5 < f \leq 9$ GHz	- 65 dBm/MHz ou - 41,3 dBm/MHz utilizando DAA ⁽²⁾	- 25 dBm ou 0 dBm
$9 < f \leq 10,6$ GHz	- 65 dBm/MHz	- 25 dBm
$f > 10,6$ GHz	- 85 dBm/MHz	- 45 dBm

⁽¹⁾ Dentro da faixa de 3,1 GHz a 4,8 GHz. A técnica de mitigação do ciclo de funcionamento baixo (na sigla inglesa, LDC — Low Duty Cycle) e os seus limites estão definidos na norma ETSI EN 302 065-1.

⁽²⁾ Dentro das faixas de 3,1GHz a 4,8GHz e 8,5GHz a 9GHz. A técnica de mitigação de «detetar e evitar» (na sigla inglesa, DAA — Detect and Avoid) e os seus limites estão definidos na norma ETSI EN 302 065-1.

3.2 Circuito Integrado UWB: DWM1000

O DWM1000 é um dispositivo desenvolvido pela Decawave [28] direcionado para sistemas de localização em espaço interior e sistemas de comunicação baseados na tecnologia UWB.

Optou-se pela escolha deste módulo em detrimento de outros ICs UWB pelo facto de operar como transmissor e recetor, apresentando uma antena incorporada, sendo por isso, um dispositivo de fácil integração a um custo acessível. Também se constatou que é um produto fiável dado que a empresa mencionada apresenta garantias de qualidade no fabrico e performance do produto, disponibilizando ainda, vários artigos, informação e manuais de suporte úteis para o desenvolvedor. A breve descrição feita neste tópico é baseada no *data sheet* do módulo [29].

O DWM1000, que se observa na figura 3.8, tem integrado o chip do transceptor CMOS RF DW1000, isto é, um chip que opera como transmissor e recetor, bem como antena e, circuitos RF e analógicos associados. Este pequeno módulo de baixa potência (consome 200nA em modo de baixo consumo) é compatível com a norma IEEE 802.15.4, sendo a potência de transmissão programável.

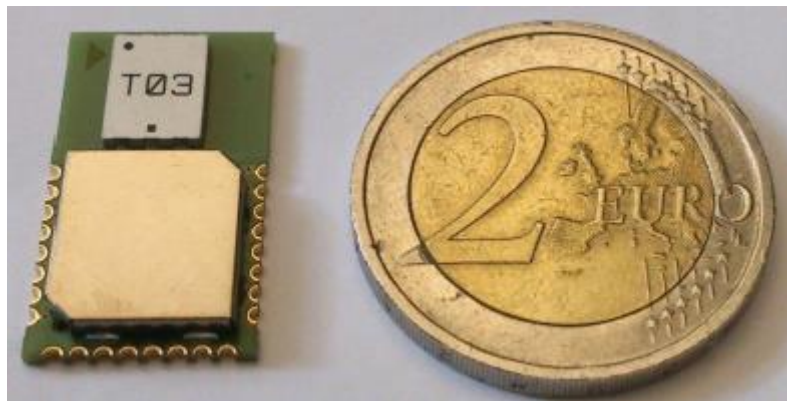


Figura 3.8: Módulo DWM1000. [30]

Para além disso é desenhado para operar respeitando as máscaras de espectro impostas pela FCC (*Federal Communications Commission*) e ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), federações que regulamentam as emissões RF. Suporta 4 bandas de RF entre 3,5GHz e 6,5GHz. Um recetor coerente projetado para obter um alcance máximo de aproximadamente 300m em linha de vista permite uma medição de tempos de envio e chegada de tramas bastante precisos (dezenas de pico-segundos). Assim é possível o cálculo de uma distância (pela velocidade da luz) com uma exatidão de 10cm ao dispositivo alvo.

O módulo permite a transmissão de um máximo de 1023 *bytes* por pacote de dados para aplicações de alto *bitrate*, sendo possível transmitir a 3 ritmos distintos: 110Kbps, 850Kbps, 6,8Mbps. Tem disponível uma interface SPI (*Serial Peripheral Interface*) e algumas funcionalidades para suporte de acesso ao meio (*Medium Access Control*).

Na figura 3.9 apresenta-se o diagrama de blocos do transceptor DWM1000.

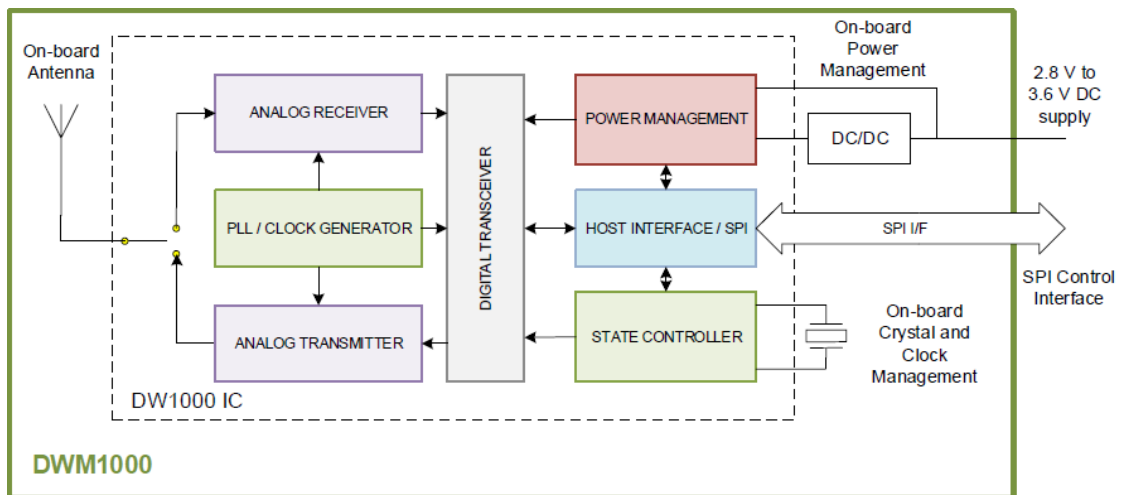


Figura 3.9: Diagrama de blocos do módulo DWM1000. [29]

O transceptor é composto assim pelos seguintes blocos:

- *Analog Receiver e Transmitter*: recetor e transmissor analógico;
- *PLL / Clock Generator*: cristal e sinais de relógio;
- *Digital Transceiver*: relativo ao processamento digital dos sinais UWB;
- *Power Management*: alimentação do circuito;
- *Host Interface/SPI*: interface de conexão SPI;
- *State Controller*: máquina de controlo de estados do dispositivo.

3.3 Métrica de medição de sinal RF

Para efetuar a localização dos nós móveis são necessárias medidas referenciadas pelo menos a 3 nós fixos, para obter uma localização em 2D, sendo necessários 4 nós não coplanares para uma localização a 3D. O espaçamento máximo entre nós fixos é determinado pela conectividade aos nós móveis. Assim, a instalação dos nós fixos é dependente das condições do meio em redor bem como a precisão e número de nós móveis a suportar pelo sistema de localização. [31]

Existem 2 métodos de medição de tempo que são suportados pelo DWM1000: o TDoA e o RTT, já referenciados neste documento nas secções 2.3.2 e 2.3.4 respetivamente.

O uso de TDoA é útil para sistemas RTLS de baixa potência, sobretudo para uma densidade elevada de nós móveis, que apenas precisam de enviar um sinal periódico contendo a sua identificação, envolvendo por isso, a troca de um número reduzido de mensagens entre nós fixos e móveis. Apesar disso, esta abordagem implica a sincronização do relógio dos nós fixos, que pode ser feita através de técnicas com fios ou através da ligação sem fios. [31][32]

A primeira opção torna a instalação do sistema de localização mais complexa, pois para além da passagem de cablagem (usualmente CAT5, um cabo de par trançado), é necessário uma unidade que gera o sinal de relógio e sincronização que é parte integrante de uma rede de distribuição proporcionada através de repetidores, como se pode observar de forma conceptual na figura 3.10. [33]

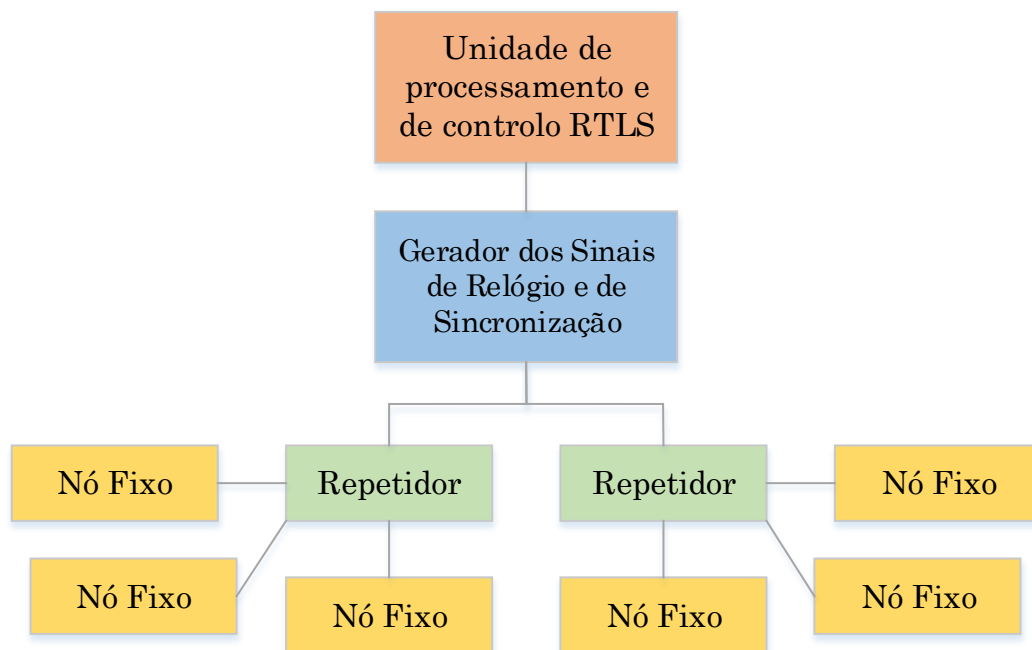


Figura 3.10: Diagrama conceptual da sincronização com fios dos nós fixos. [33]

A sincronização também pode ser feita sem fios. Contudo esta opção não é viável pelo facto de ser necessária a utilização de parte do espectro UWB e com isso o número de nós móveis que o sistema pode ter ativos em simultâneo é mais reduzido.

Relativamente ao método de medida RTT, também designado de tempo de voo (*Time of Flight*, TOF), é utilizado num esquema denominado de *Two Way Ranging* (TWR) [34], pois o nó móvel também opera como recetor proporcionando a comunicação nos dois sentidos, que tem como principal vantagem ser uma técnica que não requer a sincronização dos nós fixos. O esquema de TWR representado na figura 3.11 pode ser descrito em algumas etapas:

- O nó fixo transmite uma mensagem para o nó móvel e inicia uma contagem de tempo desde o instante em que o SFD (*Start of Frame Delimiter*) é transmitido;

- O nó móvel recebe a mensagem detetando o tempo de chegada do SFD, inicia também uma contagem de tempo e após processamento envia uma resposta para o nó móvel que a informa do tempo decorrido até à transmissão do SFD pela sua antena;

- O nó fixo recebe o pacote de resposta e pára a contagem de tempo assim que o SFD chega à sua antena;

- O nó fixo calcula o tempo de propagação médio, T_{pm} , dado por:

$$T_{pm} = ((t_{RXA} - t_{TXA}) - (t_{RXB} - t_{TXB})) / 2 = (t_A - t_B) / 2.$$

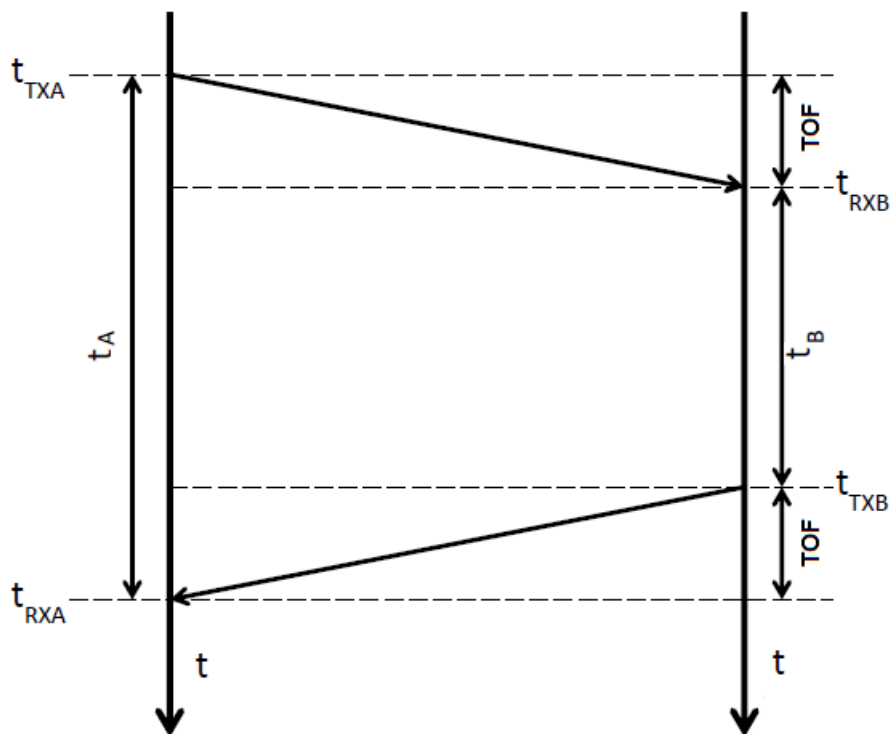


Figura 3.11: Esquema de TWR. [34]

A instalação do equipamento nesta abordagem é mais simples, permitindo que a estrutura de nós fixos seja adaptável, ou seja, os nós fixos facilmente podem ser mudados de posição com objetivo de ajuste ou devido à alteração da área de cobertura. Por outro lado, os dispositivos móveis e fixos trocam um maior número mensagens relativamente ao TDoA. Cada nó móvel necessita de comunicar pelo menos com 3 nós fixos efetuando uma receção e transmissão adicional implicando um maior consumo de energia. [31]

Neste contexto, o sistema a desenvolver irá ser baseado no RTT, em detrimento da técnica de TDoA, pois, apesar desta ser teoricamente mais

eficiente em termos energéticos, é mais complexa e de elevado custo de hardware devido à sincronização que é necessária entre os nós fixos.

A Decawave propôs um melhoramento do TWR, o TWR simétrico de dois sentidos, que se baseia no mesmo princípio mas requer a troca de 2 mensagens adicionais em relação ao método tradicional de TWR, conseguindo minimizar erros devido a desvios de frequência nos sinais de relógio dos nós móveis e nós fixos [35]. Esse esquema de medição de tempos descreve-se em 2 fases, a fase de descoberta e a fase de medida, descritas e ilustradas na figura 3.12. [36]

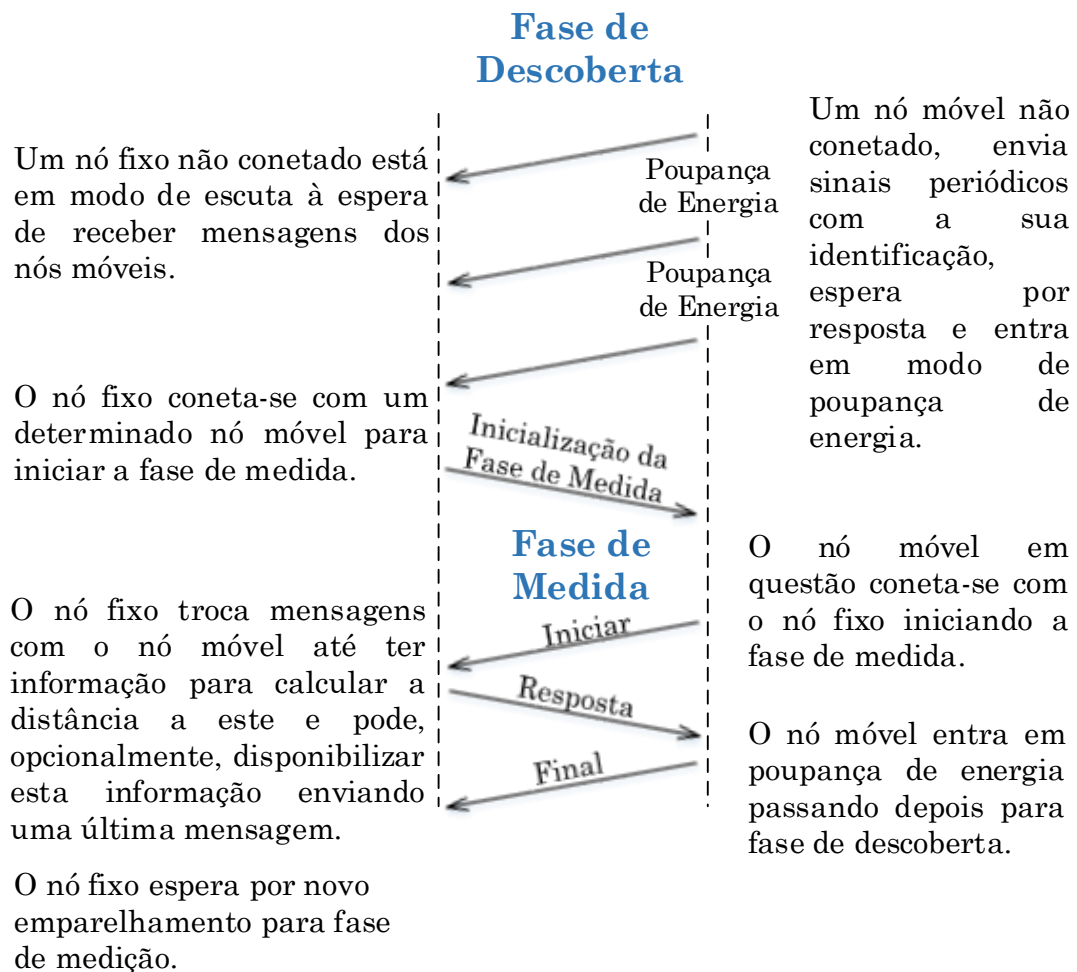


Figura 3.12: Esquema de TWR simétrico de dois sentidos. [36]

3.4 Sumário

Neste capítulo descreveu-se de forma mais detalhada a tecnologia UWB, citando-se as características que a tornam numa tecnologia com grande potencialidade para aplicação no desenvolvimento de sistemas de localização em espaços interiores. Foram expostas também algumas das suas fragilidades.

Foram mencionadas a norma relativa à tecnologia em questão (IEEE 802.15.4) e as normas para aprovação dos sistemas UWB.

Foi realizada uma síntese das características mais importantes do transceptor DWM1000 que se adotou para o desenvolvimento do projeto, bem como quais os motivos inerentes a esta opção.

Elaborou-se uma análise dos esquemas de comunicação que possibilitam a medição de tempos de propagação entre os nós móveis e os nós fixos.

4. Possíveis aplicações do sistema de localização

Neste capítulo são referidas e descritas de forma breve algumas das diversas aplicações do sistema desenvolvido, nos setores dominantes do mercado: saúde [37], segurança [38] e logística.

4.1 Saúde

O sistema pode ser utilizado em sistemas de gestão ou de prestação de serviços de saúde, tais como:

- Segurança e proteção de pacientes e profissionais, permitindo identificar o acesso a áreas restritas, garantindo que pacientes como bebês, crianças, idosos ou doentes com necessidades especiais não sejam removidos dos locais habituais por pessoal não autorizado (evitar raptos e trocas de bebês à nascença);
- Em casos de emergência permite que as notificações dos serviços de emergência cheguem de forma rápida aos destinatários;
- Diagnóstico de algumas doenças, nomeadamente do foro psicológico, distinguindo movimentos característicos de demência;

4.2 Segurança

O sistema de localização que foi desenvolvido apresenta grande utilidade em aplicações de segurança e proteção, nomeadamente:

- Na proteção e rastreamento de bens, sendo ativado um alarme em caso do objeto ser movido sem a devida autorização;
- Na segurança e proteção de pessoas, identificando o acesso a áreas restritas e permitindo disponibilizar informações ou alertas ao utilizador. Facilita a segurança e proteção de pessoas em edifícios, evitando alguns dos procedimentos manuais de segurança realizados por pessoas contratadas para o efeito, dado que qualquer pessoa que transporte um nó móvel pode ser localizada dentro de um edifício e a qualquer altura. Os museus, as prisões, as escolas e infantários são exemplos concretos de locais onde o sistema de localização se mostra de grande utilidade;
- No auxílio dos bombeiros, permitindo fornecer um serviço que, baseado na posição relativa dos seus membros, consiga disponibilizar estratégias operacionais que otimizem o combate aos incêndios;

- No auxílio de militares no campo treino e de combate, permitindo ajustar a posição dos seus membros em tempo real, adotando antecipadamente a estratégia mais adequada às circunstâncias.

4.3 Logística

A localização e rastreamento de paletes, embalagens e artigos em armazéns e em atividades de gestão de meios e materiais, possibilita a redução no tempo de espera e dos custos operacionais, resultando num melhor atendimento ao cliente e numa redução do custo final de venda dos produtos.

4.4 Sumário

Neste capítulo apresentou-se algumas das possíveis aplicações do sistema desenvolvido neste projeto, comprovando-se a sua utilidade e potencial.

5. Arquitetura do Sistema

Neste capítulo descreve-se a arquitetura do sistema, bem como os seus elementos constituintes. Explica-se também de forma detalhada o modo de funcionamento do sistema, isto é, de que forma é realizada a localização relativa dos nós móveis. Numa parte final, são descritos, recorrendo a alguns exemplos, os problemas que se verificam quando vários dispositivos acedem simultaneamente ao meio de comunicação partilhado, e os procedimentos aplicados para reduzir o seu efeito no desempenho do sistema.

5.1 Elementos do Sistema

Na corrente subsecção são descritos os elementos que fazem parte do sistema.

5.1.1 Nó móvel

O nó móvel é, tal como o nome indica, o dispositivo móvel que se destina a ser transportado pelo objeto ou pessoa a localizar, permitindo aos nós fixos (ou localizadores) calcularem as distâncias ao mesmo, baseado num esquema idêntico ao TWR simétrico de dois sentidos, abordado na secção 3.3 e ilustrado na figura 3.12 que é descrito de seguida no princípio de funcionamento. Para isso, pretende-se utilizar a menor energia possível, maximizando desta forma a sua autonomia.

O nó móvel, cujo diagrama de blocos é representado na figura 5.1, possui um

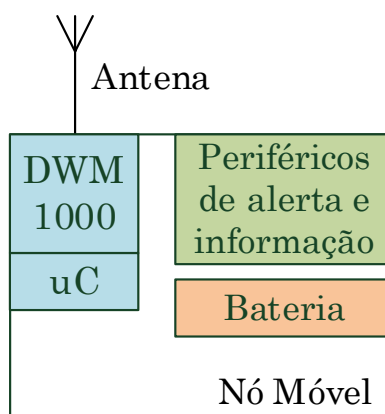


Figura 5.1: Diagrama de blocos do nó móvel.

módulo UWB, um microcontrolador (μ C), periféricos de alerta e informação (dispositivos de saída de informação que são usados para interagir com o utilizador), nomeadamente um motor de vibração (um dispositivo que produz

uma vibração quando acionado e por isso tem grande utilidade em aplicações direcionadas para doentes com deficiência auditiva e/ou visual), um LED de sinalização e uma campainha (dispositivo acústico que é acionado de forma elétrica), sendo alimentado por uma bateria recarregável. No capítulo seguinte (secção 6.1.1) encontra-se informação mais detalhada do *hardware* do mesmo.

5.1.2 Nó fixo

O nó fixo ou localizador, cujo diagrama de blocos é representado na figura 5.2 é o elemento responsável pelo cálculo da distância aos nós móveis.

Possui essencialmente um módulo UWB, um microcontrolador (μ C), um RTCC (*Real Time Clock and Calendar*), um módulo *ethernet* (elemento de ligação numa arquitetura de interconexão de dispositivos em redes de alto fluxo de dados por cabo, IEEE 802.3) e um módulo *WiFi* (IEEE 802.11) cuja função se prende com o transporte de dados para camadas superiores.

Pode-se obter mais informação sobre o *hardware* do mesmo na secção 6.1.2 do capítulo seguinte.

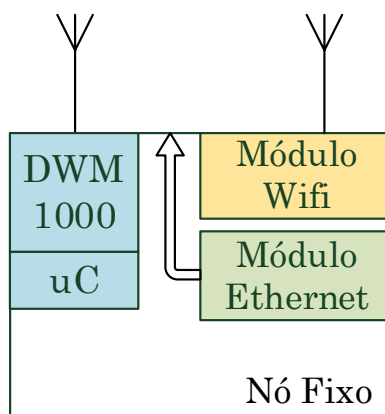


Figura 5.2: Diagrama de blocos do nó fixo.

5.1.3 Infraestrutura de Comunicações

A infraestrutura de comunicações é o elo intermédio de ligação entre os nós fixos e a aplicação servidora. A sua funcionalidade é receber e encaminhar mensagens provenientes dos nós fixos para a aplicação servidora. Estas mensagens são encapsuladas com um protocolo, escolhendo-se o IEEE 802.11 para o ensaio do sistema, contendo as distâncias aos nós móveis, origem (identificação do nó fixo) e destino IP (protocolo de internet) correspondente a aplicação servidora.

5.1.4 Aplicação Servidora

A aplicação servidora é responsável pela receção e processamento das mensagens provenientes dos nós fixos que contém as distâncias calculadas dos

nós fixos aos nós móveis, para posteriormente, estimar a localização relativa do alvo em questão. É também a entidade responsável por responder aos pedidos do utilizador, fornecendo a localização em tempo real e serviços monitorização.

Futuramente e consoante a aplicação, pode-se armazenar a informação numa base de dados, guardando todos os eventos recentes da rede, permitindo ao utilizador aceder, por exemplo, à sua localização 1h atrás.

No presente trabalho, a aplicação servidora é realizada por um computador portátil ligado a uma rede local, no qual é executada uma aplicação responsável pela interpretação dos pacotes de informação, recebidos dos nós fixos, que contém as distâncias medidas aos móveis, de forma a, posteriormente, disponibilizar a sua localização ao utilizador. O protocolo de transporte escolhido foi o UDP, um protocolo de transporte adequado para sistemas RTLS, dado que permite o envio de dados sem que seja estabelecida uma conexão, não havendo controlo de fluxos nem garantias de entrega de dados. Este procedimento será descrito de forma mais detalhada na secção 6.2.3, na qual se explica os passos seguidos no desenvolvimento da aplicação.

5.2 Modo de Funcionamento

Os nós móveis comunicam com 3 ou mais nós fixos para que estes tenham informação para calcular as distâncias aos mesmos. Estas distâncias são enviadas para a aplicação servidora que determina a localização relativa dos nós móveis e a representa num mapa 2D. Perante o exposto apresenta-se o diagrama de blocos do sistema na figura 5.3, observando-se as ligações entre os elementos que fazem parte do sistema.

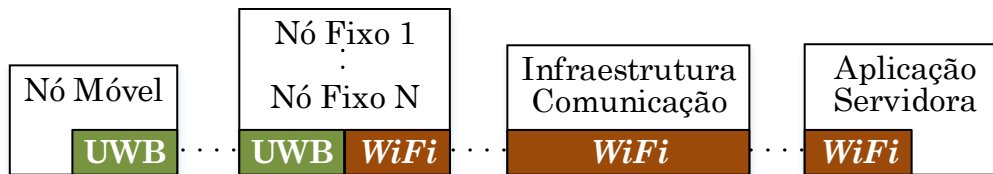


Figura 5.3: Diagrama de blocos do sistema.

No processo de desenvolvimento do *firmware* verificou-se que se pode efetuar apenas a fase de medição do esquema de TWR simétrico de dois sentidos, sendo possível reduzir o consumo de energia devido à troca de um menor número de mensagens (entre o nó fixo e o nó móvel), que se representa na figura 5.4, conseguindo-se minimizar igualmente os erros devido a desvios de frequência nos sinais de relógio dos nós móveis e nós fixos. [35]

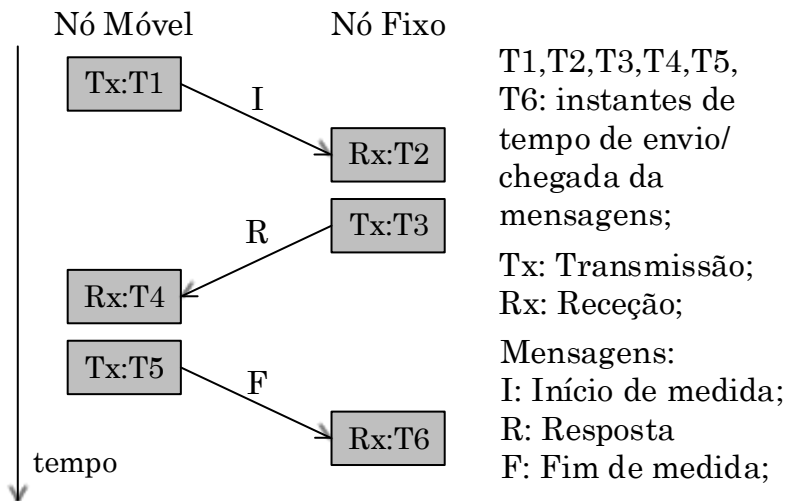


Figura 5.4: TWR simétrico de dois sentidos simplificado (TWRS).

O esquema TWR simétrico de dois sentidos simplificado, é designado de TWRS ao longo deste documento.

O nó móvel é responsável pelo início da comunicação, sendo usados 3 tipos de mensagens, que se observam na figura 5.5, importantes para a compreensão do modo de funcionamento do sistema. O formato das mensagens respeita a norma IEEE 802.15.4 (referenciada no tópico 3.1.5), sendo o campo de dados representado na figura 5.5.

Mensagem início de medida:			ID: identificador do dispositivo;		
ID Origem	ID Destino	CRC	CRC: Cyclic Redundancy Check;		
2 bytes	2 bytes	2 bytes	T1, T4, T5: instantes de tempo de envio/chegada das mensagens no nó móvel;		
Mensagem resposta:					
ID Origem	ID Destino	Comando	CRC		
2 bytes	2 bytes	1 byte	2 bytes		
Mensagem fim de medida:					
ID Origem	ID Destino	T1	T4	T5	CRC
2 bytes	2 bytes	4 bytes	5 bytes	4 bytes	2 bytes

Figura 5.5: Formato do campo de dados das mensagens UWB.

Pode verificar-se a partir da figura anterior, 5.5, que todas as mensagens tem um campo de CRC (*Cyclic Redundancy Check*) que significa verificação de redundância cíclica e é um método para deteção de erros geralmente usado na comunicação digital. A mensagem de resposta contém um campo designado de comando, com o objetivo de ser usado para acionar os periféricos do nó móvel (LED, motor de vibração e campainha), de forma a informar o utilizador de determinado estado ou sinalizar situações de perigo. O ID (identificador) é um número único que identifica o dispositivo.

A partir do esquema simplificado representado na figura 5.4, calcula-se a distância do nó fixo ao nó móvel, baseada nos tempos de propagação (ida/volta)

do sinal, que podem ser deduzidos pelos instantes de tempo medidos pelo esquema de comunicação UWB utilizado, e na velocidade da luz. De seguida, descreve-se o procedimento de cálculo da distância:

$$\text{Tempo de Propagação Médio} = \left(\frac{(T4-T1) - (T3-T2)}{2} \right) + \left(\frac{(T6-T3) - (T5-T4)}{2} \right) / 2$$

Tempos de ida e volta do nó móvel para o nó fixo
Tempos de ida e volta do nó fixo para o nó móvel

Simplificando:

$$\text{Tempo de Propagação Médio} = ((T4-T1) - (T3-T2) + (T6-T3) - (T5-T4))/4$$

Por fim:

$$\text{Distância} = \text{Tempo de Propagação Médio} \times \text{Velocidade da Luz}$$

Os nós móveis executam o TWRS com cada nó fixo de forma sequencial em tempo, começando pelos nós fixos de identificador de mais baixo. Depois de realizada a comunicação, no mínimo com 3 nós fixos (para ser possível aplicar a triangulação), obtém-se as distâncias dos nós fixos ao nó móvel. Assim que o nó móvel termina a execução do TWRS entra em modo de poupança de energia até nova fase de medida (realização do TWRS), que é definida pelo intervalo de amostragem estipulado para a atualização da posição estimada. Este procedimento é representado na figura 5.6, assumindo que são usados 3 nós fixos para determinar a localização dos nós móveis.

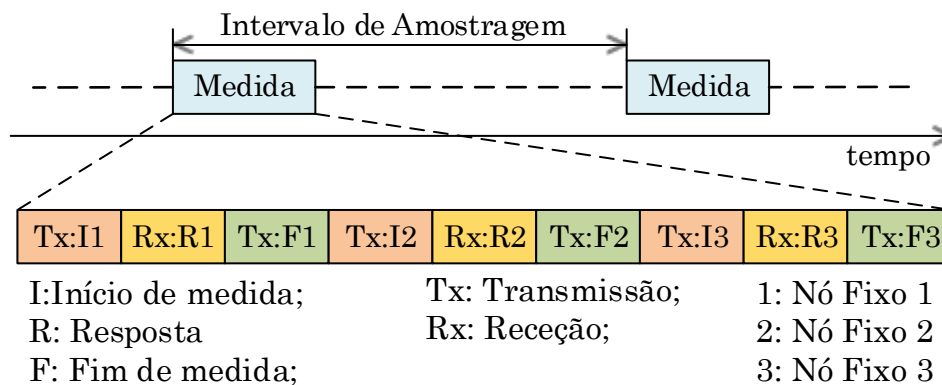


Figura 5.6: Diagrama temporal da atividade do nó móvel.

Os nós fixos estão sempre ativos para receber mensagens, dado que o consumo energético não é considerado significativo, pois estes dispositivos geralmente não mudam de posição depois da instalação do sistema e por isso são usualmente alimentados por uma fonte de alimentação ou uma bateria de 12V. Assim, sempre que um nó fixo recebe uma mensagem, sabe à partida que tem de guardar o seu identificador, correspondente a um nó móvel, e o instante de receção (T2) da mesma. De seguida, responde com uma mensagem do tipo resposta (cujo formato se pode observar na figura 5.5) para o nó móvel que iniciou a comunicação (cujo identificador foi guardado anteriormente) e guarda o instante de envio da mensagem (T3). Por fim, após um intervalo de tempo

predefinido, volta a estar novamente pronto a receber (ativar o recetor), adquire a mensagem, verifica se o identificador corresponde ao guardado anteriormente, para garantir que está a receber uma mensagem do mesmo nó móvel, e guarda a mesma, anotando o tempo de receção (T6). Assim, o nó fixo calcula a distância ao nó móvel pois tem em sua posse todos os instantes de envio e receção das mensagens trocadas entre si e o nó móvel, aqueles que foram guardados durante a comunicação (T2,T3,T6), e aqueles que são encapsulados na última mensagem recebida do nó móvel (T1,T4,T5).

Assim que os nós fixos obtêm as distâncias aos nós móveis, enviam tramas (recorrendo à infraestrutura de comunicação), que contém as distâncias medidas dos nós fixos aos nós móveis, para a aplicação servidora. O respetivo campo de dados das tramas é representado na figura 5.7.

ID Nó Fixo	:	ID Nó Móvel	:	Distância (cm)
2 bytes	1 byte	2 bytes	1 byte	2 bytes

Figura 5.7: Formato do campo de dados das mensagens UDP/IP.

A aplicação servidora descodifica e interpreta as tramas, isto é, agrupa as várias mensagens dos nós fixos relativas a cada nó móvel, para que, posteriormente, possa aplicar um algoritmo a partir das distâncias recolhidas, determinando em coordenadas ou representando num mapa, a localização relativa dos nós móveis em tempo real.

5.3 Estrutura de rede

Na figura 5.8 apresenta-se a estrutura da rede do sistema.

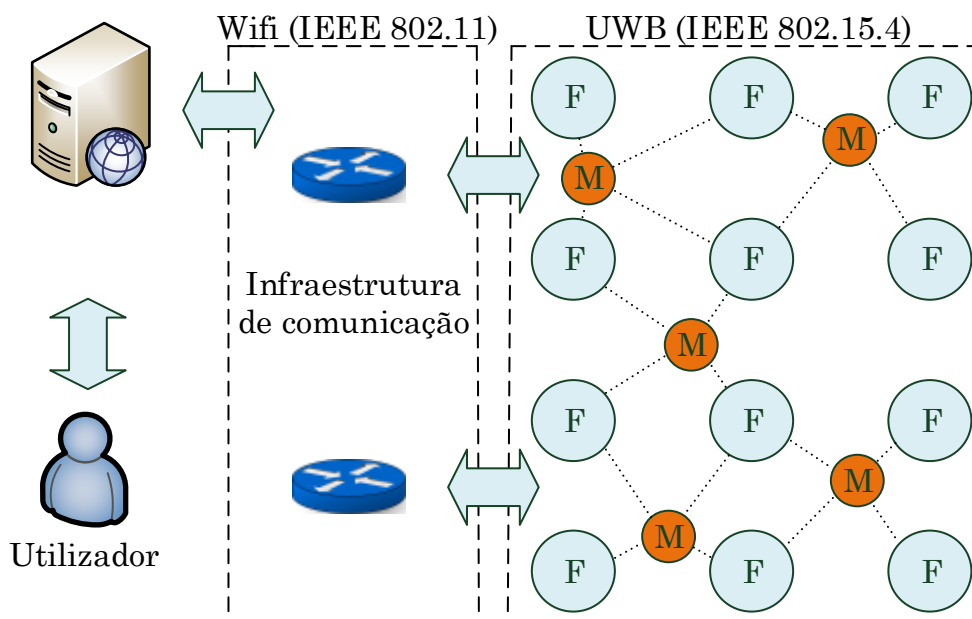


Figura 5.8: Estrutura da rede.

Os nós móveis são representados por um círculo laranja com a letra M no seu interior e os nós fixos são representados com um círculo azul claro com a letra F no seu interior.

Os nós móveis comunicam com os nós fixos segundo a norma IEEE 802.15.4. As medidas de distância calculadas nos nós fixos são enviadas por *WiFi* (IEEE 802.11) para a aplicação servidora que é responsável por disponibilizar a localização estimada dos nós móveis ao utilizador.

5.4 Múltiplo Acesso

Os nós móveis, dispositivos responsáveis pelo início da comunicação no esquema TWRS, supõem que o meio partilhado pelas ondas rádio se encontra livre. Todos os equipamentos operam à mesma frequência, que foi escolhida de forma a maximizar o desempenho do sistema e é discutida no desenvolvimento do *firmware*, subsecção 6.2.1.

Neste contexto, constata-se que podem ocorrer falhas de comunicação, pois a receção pode falhar no caso dos dispositivos receberem mensagens erradas (que não lhe eram destinadas) pelo facto de outros dispositivos transmitirem no mesmo instante de tempo. Assim, podem acontecer erros na troca das 3 mensagens que permitem a realização do esquema TWRS quando existem vários dispositivos ativos em simultâneo e prontos a receber. Por outro lado os nós fixos podem não responder, por estarem a processar pedidos, estando já conectados com um nó móvel. Também poderá existir falta de conectividade em ambos os sentidos devido condições inesperadas do meio em redor, verificando-se uma ausência de resposta no nó móvel nestes casos.

Considerando o referido anteriormente, estabeleceu-se janelas de receção curtas, cerca de 300 μ s, isto é, o recetor está ativo durante este tempo e a partir daí, se não for recebida nenhuma mensagem, o dispositivo desativa o recetor. O nó móvel, ativará o recetor para receber a mensagem de resposta apenas depois de ser iniciado novamente o TWRS, enquanto que o nó fixo ativará o recetor apenas quando for para receber a mensagem final de medida (medindo-se aproximadamente 8,5ms depois de receber a mensagem de início de medida). Desta forma, reduz-se a probabilidade de haver vários dispositivos ativos em simultâneo e ocorrerem erros nas mensagens recebidas.

São também efetuadas transmissões adicionais por parte do nó móvel quando são detetadas mensagens erradas na receção, descrevendo-se de seguida, mais detalhadamente recorrendo a alguns exemplos, quais os problemas relativos ao múltiplo acesso no esquema de TWRS e as formas de tornar o sistema eficiente, garantindo que são recebidas com sucesso uma percentagem elevada de mensagens pelos dispositivos ativos na rede.

5.4.1 Receção errada ou ausência de resposta no nó móvel

Quando vários nós móveis tentam iniciar comunicação com um nó fixo, podem não obter resposta, pois o nó fixo em questão pode já estar a

responder a um pedido de comunicação e, portanto, só ficará livre depois de realizar o esquema TWRS com o nó móvel com o qual está emparelhado. Também pode receber uma resposta errada se houver outro nó fixo a transmitir em simultâneo, para além daquele que foi requisitado.

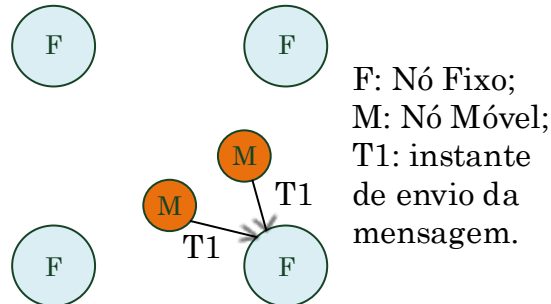


Figura 5.9: Transmissão em simultâneo de dois nós móveis no início da comunicação.

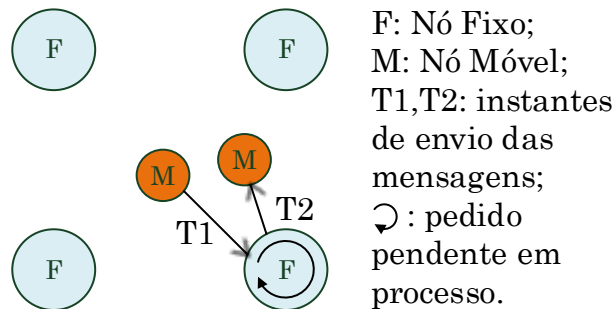


Figura 5.10: Nó móvel tentando-se conectar a um nó fixo já ocupado.

A partir da figura 5.9, pode verificar-se um exemplo em que apenas um nó móvel vai conseguir se conectar com um nó fixo pois, assim que este recebe uma mensagem, vai desativar o recetor e efetuar o TWRS com o nó móvel do qual recebeu a mensagem, respondendo ao pedido de medida. O nó fixo ficará assim conectado com esse móvel até à finalização do esquema TWRS como se verifica a partir da figura 5.10. Deste modo, um nó móvel que envie uma mensagem de início de medida nesse período, não obterá resposta ou obterá uma resposta que não lhe é destinada. Esse nó móvel voltará a tentar iniciar a comunicação com o nó fixo mais tarde, passado um intervalo de tempo conhecido *a priori* de aproximadamente 13,5ms. Este intervalo de tempo é aquele que demora a comunicação entre os dispositivos implementando o esquema TWRS que tem como objetivo de obter a distância do nó fixo ao nó móvel.

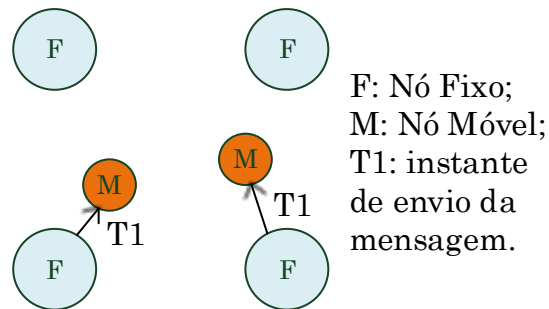


Figura 5.11: Transmissão em simultâneo de dois nós fixos.

A figura 5.11 representa um exemplo em que dois nós fixos respondem em simultâneo para os nós móveis com os quais estão conectados, resultando na possibilidade de erro de mensagens. Face a este exemplo, bem como aos anteriores mencionados, são realizadas até 4 transmissões, um número igual ao número de nós móveis ativos na rede menos um (considerando que para efeitos de ensaio estarão ativos no máximo 5 nós móveis), assegurando que todos os nós móveis conseguirão uma janela de tempo livre para iniciarem a comunicação com os nós fixos e garantir que obtêm a mensagem de resposta dos mesmos com sucesso. Este procedimento também é útil quando existem condições inesperadas do ambiente em redor que atenuam o sinal RF, resultando numa perda de conectividade entre os dispositivos.

Para além disso, os nós móveis raramente vão estar exatamente no mesmo sítio e por isso os tempos de propagação ao nó fixo “alvo” serão diferentes, minimizando os erros na receção verificados no caso da figura 5.11 e outros casos semelhantes em que existem dois ou mais dispositivos a transmitir no mesmo instante de tempo, mas com destinos diferentes.

5.4.2 Receção errada da mensagem final de medida

Quando os nós fixos estão ativos para receber a última mensagem final de medida também podem ocorrer erros na receção, caso hajam outros dispositivos a transmitir em simultâneo. A figura 5.12 representa um caso em

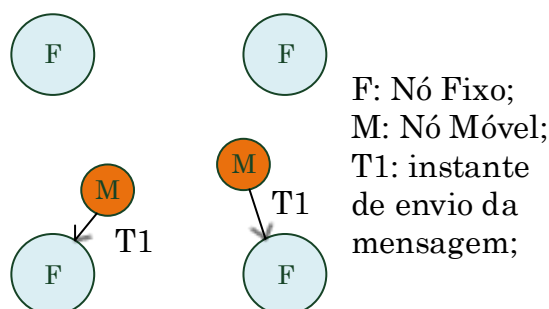


Figura 5.12: Transmissão em simultâneo de dois nós móveis que transmitem a mensagem final de medida.

que existem dois nós móveis a transmitir no mesmo instante de tempo e por isso as mensagens podem chegar erradas ao destino.

Considerando o cenário representado na figura 5.12, e outros em que existe erro na receção da mensagem final de medida nos nós fixos, verifica-se que estes (que são responsáveis por calcular a distância ao nó móvel com quem estabeleceram comunicação e enviar esse valor para ser processado pela aplicação servidora) vão falhar esse envio durante esses instantes de tempo. Porém, o estabelecimento de janelas curtas de receção e o facto dos nós móveis raramente se encontrarem no mesmo sítio, como referido anteriormente, resultam numa minimização das possíveis colisões que podem ocorrer no acesso ao meio.

Para além disso, os dispositivos concorrem por janelas de tempo designadas para o tratamento das mensagens (receção, processamento e transmissão), que são cíclicas e praticamente constantes como se pode verificar na figura 5.6 secção 5.2, sendo estas maioritariamente afetadas por desvios no *offset* do cristal, responsável por gerar o sinal de relógio do microprocessador, e por atrasos no algoritmo do DWM1000, que estima o instante de receção com base no sinal adquirido, ambos com um impacto muito reduzido. Desta forma, depois de assegurada uma janela de comunicação de cada móvel com o nó fixo de ID mais baixo (o primeiro nó fixo a ser requisitado) através de retransmissões, a probabilidade de ocorrerem colisões na comunicação dos móveis com os nós fixos seguintes de ID superior, será bastante reduzida. Na figura 5.13 pode-se observar um exemplo da janela temporal do nó fixo de ID mais baixo, na qual M1, M2, M3, M4 e M5 representam os nós móveis com que estabelece comunicação.

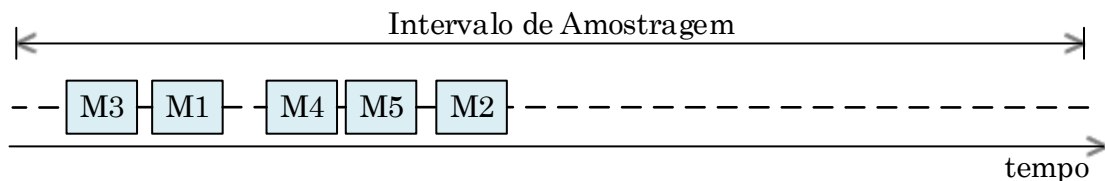


Figura 5.13: Diagrama temporal da atividade do nó Fixo de ID mais baixo.

Esta janela mantém-se, portanto, praticamente constante ao longo do tempo. Os nós fixos seguintes apresentam um diagrama temporal idêntico ao deslocar a janela que se observa na figura 5.13 para a direita, pois os nós móveis comunicam sequencialmente com os nós fixos. Verifica-se que existe um compromisso entre o número máximo nós móveis que o sistema consegue localizar em simultâneo e a taxa de atualização máxima da posição estimada que pode ser proporcionada pelo sistema.

No capítulo 7 foi testada a eficiência da abordagem considerada para que o sistema suporte o múltiplo acesso mantendo o desempenho.

5.5 Sumário

Neste capítulo explicou-se o modo de funcionamento do sistema de localização e caracterizou-se os elementos que o constituem. Constatou-se que é possível estimar a localização recorrendo a um esquema de medição de tempos de propagação que requer a troca de um menor número de mensagens entre o nó móvel e o nó fixo. Por conseguinte, aumenta-se a autonomia do nó móvel e diminui-se o tempo de utilização do meio de comunicação partilhado que é um fator inversamente proporcional ao número de nós móveis que são possíveis localizar em simultâneo.

Discutiu-se o conceito de múltiplo-acesso e descreveram-se os procedimentos aplicados para permitir que o sistema de localização consiga apresentar um bom desempenho para vários nós móveis a localizar em simultâneo. Verificou-se que existe um compromisso entre a taxa de atualização máxima de localização dos nós móveis e o número máximo de nós móveis que o sistema permite localizar em simultâneo.

6. Desenvolvimento e implementação do sistema

No presente capítulo serão descritos, numa primeira secção, todos os aspetos considerados no desenvolvimento do *hardware* dos elementos do sistema que foram feitos de raiz: o nó móvel e o nó fixo.

No tópico seguinte, descreve-se o processo de desenvolvimento do *firmware*, um programa que, ao ser aplicado no microcontrolador, permite atuar nos componentes eletrónicos que o constituem. Neste sistema, o programa tem como principal finalidade atuar no DWM1000, tanto no nó móvel como no nó fixo, tirando partido das suas capacidades de medida de tempos de partida e chegada dos sinais UWB, possibilitando a realização do esquema de TWRS. São descritos também, nas últimas secções do capítulo os procedimentos a realizar para configuração dos módulos *WiFi* e para o desenvolvimento da aplicação, a partir da qual se pode observar a localização dos nós móveis num mapa 2D.

6.1 *Hardware*

6.1.1 Nó móvel

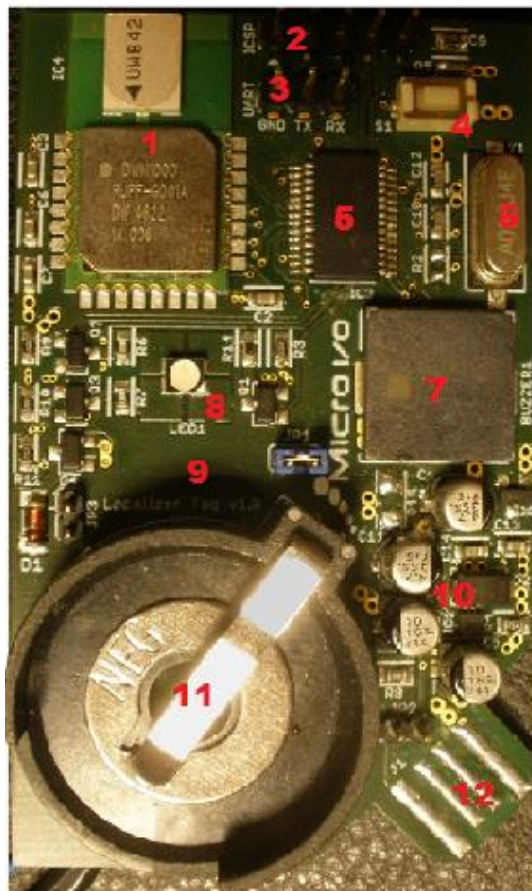
Na figura 6.1, observa-se o protótipo final do nó móvel com a respetiva descrição dos principais elementos que o constituem.

Desenvolveu-se o esquemático, um desenho dos componentes e respetivas ligações entre eles. Definiu-se assim, as tensões do circuito:

- 3,3V, que é a tensão nominal a que funcionam o microcontrolador e o DWM1000, sendo a tensão de alimentação do circuito;
- 3,6V - 4,2V que é a gama de tensão da bateria escolhida (LIR2450 3,6V [39]);
- 5V que é a tensão de entrada para carregamento da bateria.

Usou-se um microcontrolador de 8 *bits* da Microchip [40], um pic18F25K20 [41], por ser de muito baixo consumo (*Extreme Low-Power Management with nanoWatt XLP*), por incluir as interfaces de SPI (permitindo a comunicação com o DWM1000) e USART (para depuração de erros) e por ter pinos adequados para as ligações dos componentes. Para além disso, este microcontrolador dispõe de um desempenho e memória satisfatórios para executar o *firmware* idealizado nesta altura, considerando que se adquire a um preço bastante acessível. Caso o desempenho se verificasse insuficiente para o *firmware* depois desenvolvido, facilmente se trocava por um microcontrolador da mesma família numa gama superior, isto é, um microcontrolador com o

mesmo número de pinos e respetiva posição, mas com um maior desempenho e memória.



- 1- DWM1000;
- 2- Pinos ICSP;
- 3- Pinos USART;
- 4- Botão *reset*;
- 5- uC;
- 6- Cristal externo;
- 7- Campainha;
- 8- RGB LED;
- 9- Espaço para colocação futura do motor de vibração;
- 10- Eletrónica de regulação e eletrónica para carregamento da bateria;
- 11- Suporte para a bateria;
- 12- Conetor USB;

Figura 6.1: Protótipo do nó móvel (dimensões reais: 70mm x 43 mm).

Projetou-se também eletrónica adicional para:

- Regular a tensão da bateria ou de uma alimentação até 5V para a tensão de referência do circuito;
- Carregamento da bateria;
- O cristal externo conectado ao microcontrolador;
- Funcionamento dos periféricos de alerta/informação (RGB LED e campainha).

Optou-se por uma bateria de preço acessível, com um prazo de entrega viável e de dimensões reduzidas, característica importante, já que trata de um nó móvel. Deste modo optou-se pela bateria LIR2450 [39], considerando a tensão de alimentação do circuito e a corrente necessária para o funcionamento dos componentes do mesmo.

Note-se que foram realizados esquemáticos de ensaio até chegar à versão final, que está disponível em anexo neste documento, para o desenvolvimento da PCB.

Desenvolveu-se o desenho da PCB após a finalização do esquemático. Definiu-se que a placa iria ser de 2 camadas e portanto, colocaram-se os componentes apenas na camada superior, correspondente ao plano de tensão

de alimentação do circuito (3,3V), reservando a camada inferior para o plano de massa. Considerando que a eletrônica RF do circuito já se encontra embutida no DWM1000, não se tomaram precauções especiais no seu desenho, garantido apenas que não passariam pistas, sobretudo de alimentação, nas proximidades da antena do DWM1000, dado que já que a energia eletromagnética circundante pode causar harmônicos que se propagam através das linhas de alimentação, causando a degradação do desempenho do circuito. Por outro lado, procurou-se desenvolver uma PCB de dimensões reduzidas, já que esta se destina a ser transportada pela pessoa ou objeto a localizar.

Foram realizadas pesquisas de mercado de forma a optar pelos componentes eletrônicos de custo mais acessível, com tempo de entrega viável e que apresentassem as características requeridas em termos elétricos. A encomenda de pequenas quantidades de motores de vibração apresentou-se acima das expectativas de custo por parte da entidade que financiou este projeto (Micro IO) e considerando também que não era um componente essencial para o primeiro ensaio do sistema, prosseguiu-se, desta forma, sem componente citado.

6.1.2 Nó fixo

Na figura 6.2 pode-se observar o protótipo final do nó fixo com a respetiva descrição dos componentes relevantes que o constituem.

Tal como no nó móvel, delineou-se o esquemático para o nó fixo, definindo-se as tensões do circuito:

- 3,3V, que é a tensão nominal a que funcionam o microcontrolador, o DWM1000 e o módulo RN-171, sendo por isso a tensão de alimentação do circuito;
- 5V para o funcionamento do USB *on the go* [42], uma funcionalidade do USB 2.0 que permite a conexão de periféricos entre si, sem a necessidade de um PC, e para alimentação do módulo de *ethernet* uMRF_ENC28;
- 12V de tensão de entrada.

Neste dispositivo optou-se por um PIC32MX450F256H-I/PT [42] por apresentar pinos adequados para as ligações, e interfaces SPI, USART e USB que permitem a comunicação respetivamente com o transceptor DWM1000, com os módulos RN-171 [43] da Microchip (módulo IEEE 802.11 que é usado pela empresa Micro IO nos seus projetos) e uMRF_ENC28, e com periféricos exteriores. Para além disso, este microcontrolador apresenta um desempenho e memória adequados para gestão dos periféricos usados no ensaio do sistema, o DWM1000 e o RN-171, de forma a implementar o esquema TWRS e disponibilizar as medidas à aplicação servidora.

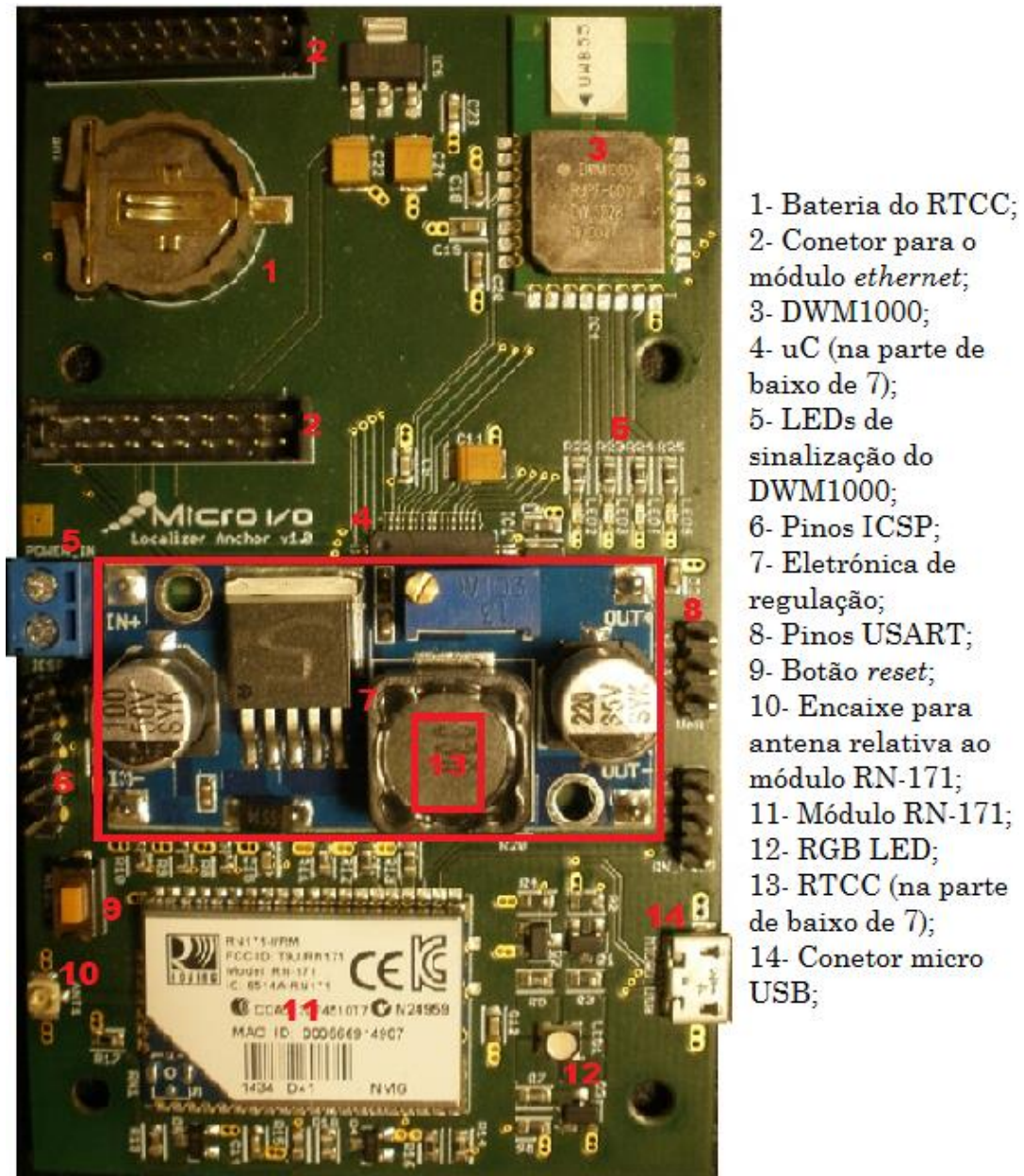


Figura 6.2: Protótipo do nó fixo (dimensões reais: 97mm x 57 mm).

Utilizou-se a eletrónica adicional projetada para o nó móvel, para funcionamento do LED, do cristal externo e do botão de *reset* conectados ao microcontrolador. Projetou-se a restante eletrónica adicional para:

- Regular a tensão de entrada de 12V para 5V e dos 5V para 3,3V, a tensão de alimentação do circuito;

- O RTCC (*Real Time Clock and Calendar*), Relógio e calendário de tempo real, MCP7940N-I/SN-ND [44] da Microchip, um dispositivo que mantém o controlo do tempo presente. Uma bateria e um cristal são componentes necessários para o seu funcionamento;

- Sinalização de estados no DWM1000 através da ligação de LEDs de cor única nos terminais adequados.

Tal como na PCB do nó móvel, a PCB do nó fixo apresenta 2 camadas, o plano superior referente a uma tensão de 3,3V e o plano de massa correspondente à camada inferior.

6.2 *Firmware*, Configurações e Aplicação

Nesta secção, são explicados os procedimentos no desenvolvimento de código, quer para programar os microcontroladores do nó móvel e do nó fixo, que se designa de *firmware*, quer para a aplicação responsável por desenhar a localização relativa do nó em 2D sabendo previamente a posição dos nós fixos.

Também são descritos os procedimentos realizados para a configuração do módulo *WiFi*, RN-171, já que este não precisou do desenvolvimento de *firmware* por motivos que serão especificados no respetivo tópico. O último tópico deste capítulo centra-se na aplicação que representa a posição estimada dos nós móveis.

6.2.1 *Firmware*

Após a realização de testes para confirmar o funcionamento do *hardware*, procedeu-se ao desenvolvimento do *firmware* para o nó móvel pois foi o primeiro protótipo a estar disponível.

Configuraram-se os pinos como entrada e saída, considerando as conexões dos dispositivos eletrónicos ao μC . Configurou-se também a frequência do oscilador do microcontrolador para 32MHz, usando o cristal externo e tirando partido do uso da PLL (*Phase Locked Loop*) que permite multiplicar a frequência do cristal de 8MHz por 4 [41].

Temporizadores

Configuraram-se dois temporizadores no microcontrolador para:

- Definir a taxa de execução do TWRS, já que é o nó móvel que inicia a comunicação. Esta taxa é a corresponde a atualização das medidas, adquiridas nos nós fixos, que depois são enviadas para a aplicação servidora que corre uma aplicação para desenhar a localização. Inicialmente estabeleceu-se uma taxa de atualização de 1Hz e depois de realizados alguns testes de campo, definiu-se uma taxa de 4Hz mais apropriada considerando que se trata de um sistema RLTS, desenhando-se por isso a localização a uma taxa de 2Hz efetuando uma média a cada duas amostras (descrita na secção 6.2.3 de seguida).

- Regular o valor de potência entregue à carga (uma campainha) através de um sinal de PWM (*Pulse With Modulation*), ou seja, um sinal modulado que permite controlar o tempo que o pino do microcontrolador (ao qual a carga está conectada) se mantém ativo. Definiu-se que o respetivo pino comuta à frequência de 4KHz para o estado ativo (tensão de 3,3V), frequência recomendada no *data sheet* [45] para maximizar o nível de pressão sonora, e

mantem-se nesse estado durante 25% do período para poupar energia, comutando depois para o estado desligado (tensão 0V).

mySleep(ms)

Também se desenvolveu uma função de atraso (*mySleep*), suspendendo a execução do programa pelo tempo (em milissegundos, ms) especificado como parâmetro. Esta função verificou-se útil para controlar o PWM dos LEDs por *software*, e para esperar que o relógio de precisão do DWM1000 esteja à frequência correta de operação depois do dispositivo “acordar” do modo de poupança de energia. O seu uso é viável já a execução do *firmware* programado no nó móvel é sequencial, não existindo vários processos a correr em simultâneo.

ledRGB_ON(colour) /ledRGB_OFF(colour)

Desenvolveram-se funções para ativar/ desativar o LED RGB, permitindo ligar individualmente cada segmento de cor. Recorrendo ao PWM por *software* facilmente se coloca o LED a piscar, podendo também ligar-se durante um determinado tempo contínuo em poupança de energia, ou seja, aos nossos olhos parece estar sempre ligado, mas na realidade configurou-se para comutar entre o estado ligado/desligado a uma frequência de 50Hz, mantendo-se no estado ativo apenas 5% do período. Pode-se também fazer uma combinação de cores de forma a obter uma cor desejada.

BuzzerON()/BuzzerOFF()

Desenvolveram-se funções para ativar/desativar a campainha recorrendo ao temporizador que gera o PWM no pino do microcontrolador a que esta está ligada, definindo-se o tempo que está ligada através da função *mySleep(ms)*;

USART

Incorporou-se no *firmware* do nó móvel um módulo da Micro IO, com funções para configurar, ler e escrever da USART, com a finalidade de ser usado para depuração de erros durante a fase de desenvolvimento do *firmware* para atingir o objetivo final, realizar o esquema TWRS.

reset_DW1000()

Uma função desenvolvida para fazer *reset* por *hardware*, isto é comutando o pino indicado para tal que está conectado ao DWM1000 para 0V e mantendo-se nesse estado durante 1ms já que na *data sheet* [29] é indicado que este tempo deve ser superior a 10ns. Depois deste procedimento comutou-se o pino novamente para 3,3V, já que é ativo baixo, isto é, só é feito *reset* quando o pino está no nível de 0V de tensão, designado de nível baixo.

setup_DW1000RSTnIRQ(enable)

Uma função desenvolvida para configurar e ativar/desativar uma interrupção externa no microcontrolador que é despoletada pelo DWM1000. A ativação/desativação da interrupção externa é feita por um parâmetro, *enable* (ativar), passado à função, 1 ou 0 respetivamente.

wakeUp(void)

Uma função desenvolvida para acordar o DWM1000 quando este está em modo de poupança de energia, comutando-se o pino indicado para tal que está conectado ao DWM1000 para 0V e mantendo-se nesse estado durante 500µs, tempo indicado no manual do utilizador [31]. Após este procedimento comutou-se o pino novamente para 3,3V, já que é ativo baixo tal como o pino de *reset*.

SPI

Desenvolveram-se funções para configurar e ativar/desativar a interface SPI. Para além disso também se desenvolveram funções específicas para enviar e receber dados por SPI do DWM1000, compatíveis com a API disponibilizada pela Decawave, uma interface com funções direcionadas para tirar partido das funcionalidades do DWM1000 que é abordada de seguida. Na figura 6.3, baseada na figura 1 manual de utilizador [31], pode-se observar o formato dos campos relativos aos sinais MOSI (dados de entrada do DWM1000) e MISO (dados de saída do DWM1000), e a tensão do SPICSn (pino de ativação de transferência SPI, que é ativo baixo) para realizar uma transação de dados com o DWM1000.

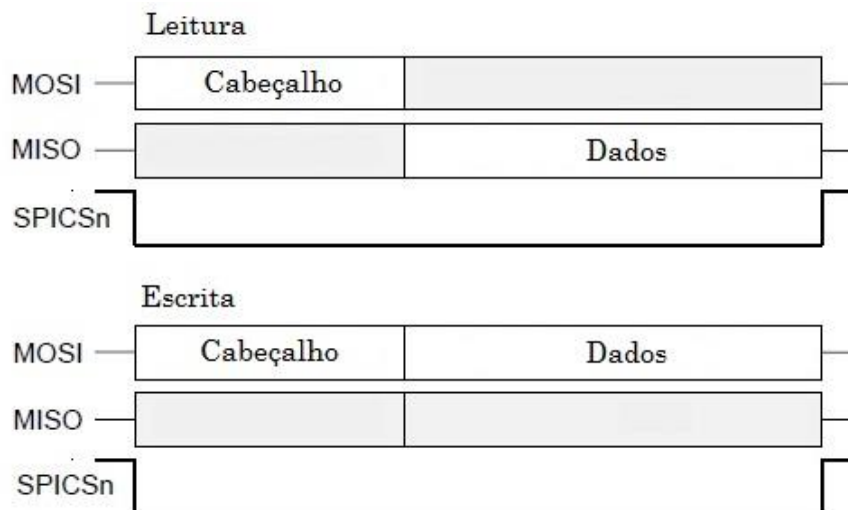


Figura 6.3: Transações SPI de leitura e escrita.

O cabeçalho indica se a transação é de leitura ou escrita e o endereço a que se pretende aceder.

API (Application Programming Interface)

Realizou-se a portabilidade da API [46] (feita para a conexão do DWM1000 com um μ C ARM Cortex M3), uma interface com funções específicas para tirar partido das funcionalidades do transceptor DWM1000. Adaptou-se esta interface para funcionar com o microcontrolador escolhido para o nó móvel, um pic18F25K20 de 8 *bits*. Neste contexto, todas as funções mencionadas anteriormente neste tópico foram feitas de raiz para o microcontrolador usado.

Efetuarão-se testes às funções de interação com o DWM1000, com o auxílio de um guia da API [46], para verificar o seu adequado funcionamento. Explorou-se e apurou-se também as funções que seriam utilizadas na implementação do esquema TWRS.

TWRS

Configurou-se o DWM1000, para operar no sentido de se obter um alcance máximo [47]. Para ambientes NLOS a frequência do canal 5, 6489,6MHz [31], apresentou maior precisão e alcance do que à frequência do canal 2, 3993,6MHz [31]. Em ambiente LOS conseguiu-se um alcance superior a 100m com o canal 2.

Implementou-se o TWRS, apenas entre dois móveis, sem preocupações de identificação dos dispositivos ou de consumo de energia. Obtiveram-se valores de distância, calculados com base nos tempos medidos, com um erro máximo de ± 30 cm em relação ao valor real, verificando-se que configurando os microcontroladores para operarem a uma velocidade de relógio máxima, de 64MHz (utilizando o relógio interno de 16MHz multiplicado por 4 com o uso da PLL) o tempo medido para obter a distância de um nó móvel relativamente a um nó fixo era mais reduzido, passando de cerca de 19ms para 13,5ms. Considerando o erro máximo verificado, implementou-se uma última versão do TWRS, no qual um máximo de 5 nós móveis seriam localizados por 4 nós fixos.

Procedeu-se, desta forma, ao desenvolvimento da interface para a camada de *hardware* relativa ao μ C do nó fixo, um PIC32MX450F256H-I/PT, de 32 *bits*. Esta camada apresenta precisamente as mesmas funcionalidades daquelas que foram descritas para o nó móvel, à exceção das funções para ativar/desativar a campainha, componente que é específica do nó móvel não sendo incorporado no *hardware* do nó fixo. Adotou-se a API que foi modificada para o microcontrolador de 8 *bits* do nó móvel, já que é compatível, dado que ambos os microcontroladores são da Microchip [40] e por isso apresentam a mesma arquitetura de memória, e porque, para além disso, problemas de truncamento de variáveis ou de uso de ponteiros não se apresentam quando se muda para um microcontrolador que tem registos de tamanho maior (32 *bits*).

Implementou-se assim, o esquema TWRS com identificação dos dispositivos, trocando mensagens com o formato indicado na figura 5.5 secção 5.2, no qual

os nós móveis estabelecem a comunicação com cada nó fixo de forma sequencial em tempo, começando nos nós fixos de identificador mais baixo e realizando retransmissões no caso de falhas, procedimento explicado na secção 5.4. Configurou-se o temporizador dos nós móveis responsável pela taxa de atualização das medidas, para uma taxa de 1Hz.

Posteriormente, realizaram-se vários testes, inicialmente apenas com um nó móvel ativo. Verificou-se que as medidas se apresentavam corretas, com o mesmo erro máximo daquele que se registou no teste entre dois nós móveis ($\pm 30\text{cm}$), apenas nos primeiros instantes de funcionamento do sistema. Com o passar do tempo o valor de distância calculado apresentava um desvio cada vez maior em relação ao valor real, mas quase constante e sempre no mesmo sentido. Por exemplo, ao colocar o nó móvel à distância de 5m de um nó fixo e mantendo-o na mesma posição, na primeira amostra o sistema calcularia uma distância hipoteticamente de 5,10m, contudo nas amostras seguintes somaria hipoteticamente 1cm a cada amostra. Assim, no final de 51s de funcionamento do sistema a medida calculada seria de 5,60m. Deste modo, descobriu-se que o tempo de processamento de ambos os dispositivos tem que ser idêntico, na ordem das dezenas de microssegundos. Este tempo é aquele que decorre, desde que o dispositivo recebe e envia mensagens, correspondente a T3-T2 e T5-T4 que se observam na figura 5.4 da secção 5.2. Adicionou-se um tempo de espera no nó fixo, já que este apresenta um maior poder de execução de instruções, de modo a tornar T5-T4 e T3-T2 idênticos na ordem das dezenas de microssegundos.

Numa fase final, colocaram-se o microcontrolador e o DWM1000 dos nós móveis em poupança de energia logo que a fase de comunicação termina, voltando apenas ao estado ativo quando se procede a nova fase de comunicação. São necessários 4ms para que o DWM1000 esteja pronto para transmitir [31], efetuando-se um tempo de espera de 5ms para iniciar o TWRS depois de “acordar” do estado de poupança de energia. Ajustou-se também o desvio verificado nas distâncias, depois de realizados vários testes de medida com e sem obstáculos, afinando os atrasos das antenas do nó fixo e móvel (tempos que são retirados aos tempos de receção estimados pelo DWM1000), e uma constante adicionada/retirada às medidas de distâncias, que se obtém nos nós fixos, que funciona como um ajuste mais fino adicional, sem a necessidade de modificar os atrasos das antenas. Redefiniu-se a taxa de atualização de localização para 4Hz.

Seguidamente, apresentam-se os fluxogramas do *firmware* programado nos nós fixos e nós móveis para executar o TWRS.

Fluxogramas

Inicialmente, são feitas as configurações necessárias do nó móvel:

- Configuração da velocidade do relógio do microcontrolador;
- Configuração dos pinos de entrada/ saída;
- Configuração da interface SPI;

- Configuração das Interrupções, incluindo a configuração da interrupção externa relativa ao DWM1000;

- Configuração do módulo DWM1000;

Realizadas as configurações (inicialização), o nó móvel está pronto a realizar o TWRS com os 4 nós fixos, começando por conectar-se com o nó fixo de ID mais baixo se este estiver a espera de pedidos.

Após a realização deste procedimento, medindo-se uma duração de aproximadamente 54ms (4 x 13,5ms), tempo de comunicação do nó móvel com um fixo), o nó móvel entra em poupança de energia. O nó móvel é o elemento responsável por iniciar a comunicação e realiza o TWRS, efetuando retransmissões se necessárias, a uma taxa de 4Hz, obtendo-se daí as medidas de distâncias respetivas a cada nó fixo, que designo de amostra de localização. Assim, no tempo restante para a próxima amostra de localização o nó móvel encontra-se em poupança de energia.

Realiza-se as configurações dos nós fixos, idênticas às referidas no nó móvel. Após a inicialização o nó fixo entra em modo de espera, estando apto a receber pedidos de nós móveis para estabelecer comunicação. Assim que o nó fixo recebe uma mensagem de um nó móvel, realiza com o mesmo o esquema TWRS. Todo o processamento necessário para o cálculo da distância a que se encontra o nó móvel é realizado pelo nó fixo. Após efetuar o cálculo e enviar uma mensagem com o valor de distância, o seu ID e o ID do respetivo móvel (com o formato da figura 5.7) para a aplicação servidora, volta ao modo de espera ficando recetivo a novos pedidos dos nós móveis.

6.2.2 Configuração do módulo *WiFi*

Após a implementação do TWRS e verificação da validade das distâncias obtidas, requeria-se à partida, o desenvolvimento de mais um módulo de *firmware* que permitisse usar módulo *WiFi* RN-171 para enviar as distâncias, calculadas nos nós fixos, para a aplicação servidora.

No entanto, com base no manual de comandos, funcionalidades avançadas e aplicações referente ao módulo da Microchip [48], verificou-se que se pode ativar módulo em modo AP (*Access Point*), ponto de acesso, através de *hardware*, efetuando um curto-circuito de um pino designado GPIO9 com um pino de tensão de 3,3V e efetuando *reset* de seguida. Deste modo, quando o módulo iniciar vai fazê-lo em modo AP com o servidor DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*) ativo e definições por defeito, permitindo outros dispositivos *WiFi* conectar-se a si. A partir daí a sua configuração torna-se acessível, já que é disponibilizada pela Microchip uma aplicação web para o efeito, bastando usar um *browser* e digitar o seu IP (*Internet Protocol*) na barra de endereço. Esta aplicação também tem uma linha de comandos útil para uma configuração rápida do módulo, recorrendo aos comandos disponibilizados no manual [48].

Para além disso, constatou-se que para enviar e receber dados com o módulo RN-171 apenas é necessário configurar a USART [48] conectada ao microcontrolador, cujo *firmware* já se encontrava desenvolvido. Sendo assim,

conectando-se ao AP, configurou-se a taxa de transmissão de dados da USART para um valor de *115200bytes/s* correspondente ao valor configurado no *firmware*, e a rede local à qual se pretende que o módulo se conecte, rede que serve de infraestrutura de comunicações. Também se configurou o tipo de protocolo, TCP e UDP (suportando os dois tipos), o IP e identificador da porta remota do anfitrião (aplicação servidora), isto é, o dispositivo com quem vai estabelecer comunicação, e IP, identificador da porta local, *netmask* e *gateway* respetivos ao módulo. Configuraram-se portanto todos os módulos de forma igual:

- IP do anfitrião: 192.168.1.100;
- Porta do anfitrião: 12345;
- Porta local: 2000;
- *Netmask*: 255.255.255.0;
- *Gateway*:192.168.1.1.

A exceção prende-se com a configuração do IP que identifica cada módulo, que tem de ser único e que foi atribuído da seguinte maneira:

- Módulo correspondente ao nó fixo 1: 192.168.1.101;
- Módulo correspondente ao nó fixo 2: 192.168.1.102;
- Módulo correspondente ao nó fixo 3: 192.168.1.103;
- Módulo correspondente ao nó fixo 4: 192.168.1.104;

Depois de realizada este procedimento, colocou-se o sistema em funcionamento, conectou-se um *pc* à rede local e definiu-se o seu IP como o do anfitrião, capturando os pacotes da rede recorrendo ao *Wireshark* [52] e verificando se todos os módulos RN-171 dos nós fixos possuíam a configuração correta.

6.2.3 Aplicação desenvolvida

Desenvolveu-se uma aplicação em java com o propósito de desenhar numa janela, em 2D, a localização dos nós móveis relativamente à posição absoluta dos nós fixos.

Conectou-se um *pc* à rede local utilizada para o ensaio, definindo-se o IP do mesmo como 192.168.1.100, que corresponde aquele que foi configurado nos módulos RN-171.

Para adquirir os pacotes *WiFi* encapsulados de acordo com o protocolo UDP abriu-se uma porta remota, um número de identificação que pode ir de 0 até 65535, de modo a que o dispositivo que se liga à rede, neste caso o computador pessoal, consiga distinguir os diversos fluxos de dados referentes às diferentes aplicações que serve em simultâneo. O identificador da porta foi definido como 12345 para corresponder com o configurado nos módulos RN-171.

Depois disso, sabendo *a priori* o formato das tramas, que se encontra representado na figura 5.7, efetuou-se um agrupamento das mesmas por ID do nó móvel.

Utilizando as distâncias, embutidas nas tramas, de acordo com o ID do nó fixo, desenhou-se, através de uma classe do java destinada para o efeito,

circunferências centradas nos nós fixos de raio correspondente à respectiva distância decifrada.

A figura 6.4 representa o desenho realizado pela aplicação relativo a apenas um nó móvel, no qual foi adicionado uma identificação hipotética dos nós fixos (P1,P2,P3 e P4), um desenho dos raios hipotéticos usados pela aplicação para desenhar as circunferências (representadas a azul na figura) e sua identificação (r_1, r_2, r_3 e r_4), de forma a ser mais perceptível ao leitor quais as circunferências que estão associadas a cada nó fixo. No entanto, na determinação da localização dos móveis, considera-se um erro médio associado às distâncias adquiridas, e por isso, para além das circunferências, desenham-se anéis (representados a azul na figura) centrados também na posição dos nós fixos, que tem uma espessura de acordo com o erro. Assim, se o erro das distâncias obtidas for de $\pm 20\text{cm}$, o anel terá uma espessura de 40cm , que depois são convertidos para *pixéis*, de acordo com a escala do desenho. Na aplicação o desenho é feito à escala de 1 *pixel* por centímetro real. Todas as figuras apresentadas no presente documento respetivas à janela da aplicação, são representadas em 55% do tamanho real em *pixéis*.

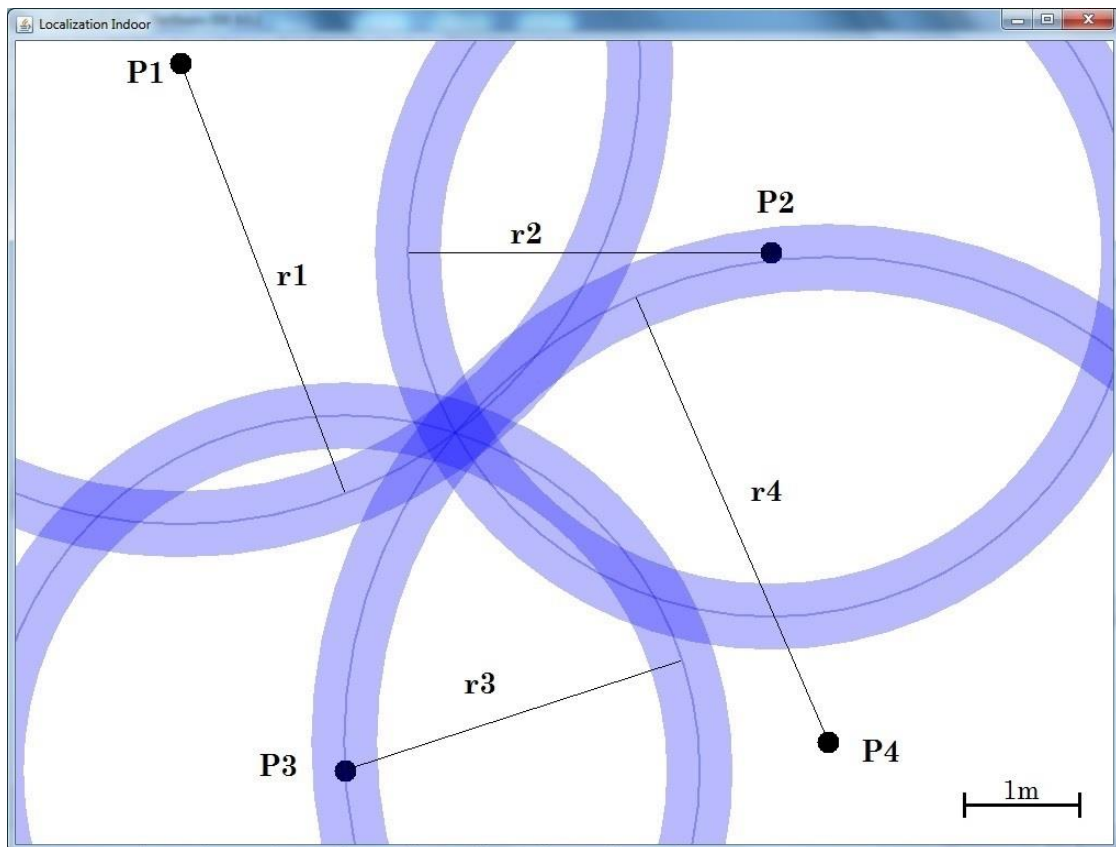


Figura 6.4: Janela da aplicação relativa à localização de um nó móvel.

Verifica-se, observando a figura 6.4, que no caso ideal a intersecção das circunferências daria a localização do nó móvel em questão, contudo, no sistema real, que tem associado erros nas medidas, a localização é dada pela mancha de azul mais sobrecarregado, que é a região de sobreposição dos anéis.

Consegue-se aplicar um algoritmo de *lateration*, através dos raios, para determinar o ponto de intersecção das circunferências. Com base em [49], no qual se pode encontrar uma análise matemática de forma a obter o ponto de intersecção de 3 esferas, e em [50], que define eixo radical, conjunto de todos os pontos que permite traçar tangentes de igual comprimento às circunferências consideradas, desenvolveu-se um algoritmo para realizar a intersecção de 4 circunferências, já que no ensaio do sistema foram utilizados 4 nós fixos para realizar a localização.

Numa última versão da aplicação, apenas se representa a localização dos nós móveis através de círculos coloridos, como se observa na figura 6.5, na qual a posição absoluta dos nós fixos é representada pelos círculos mais pequenos a preto.

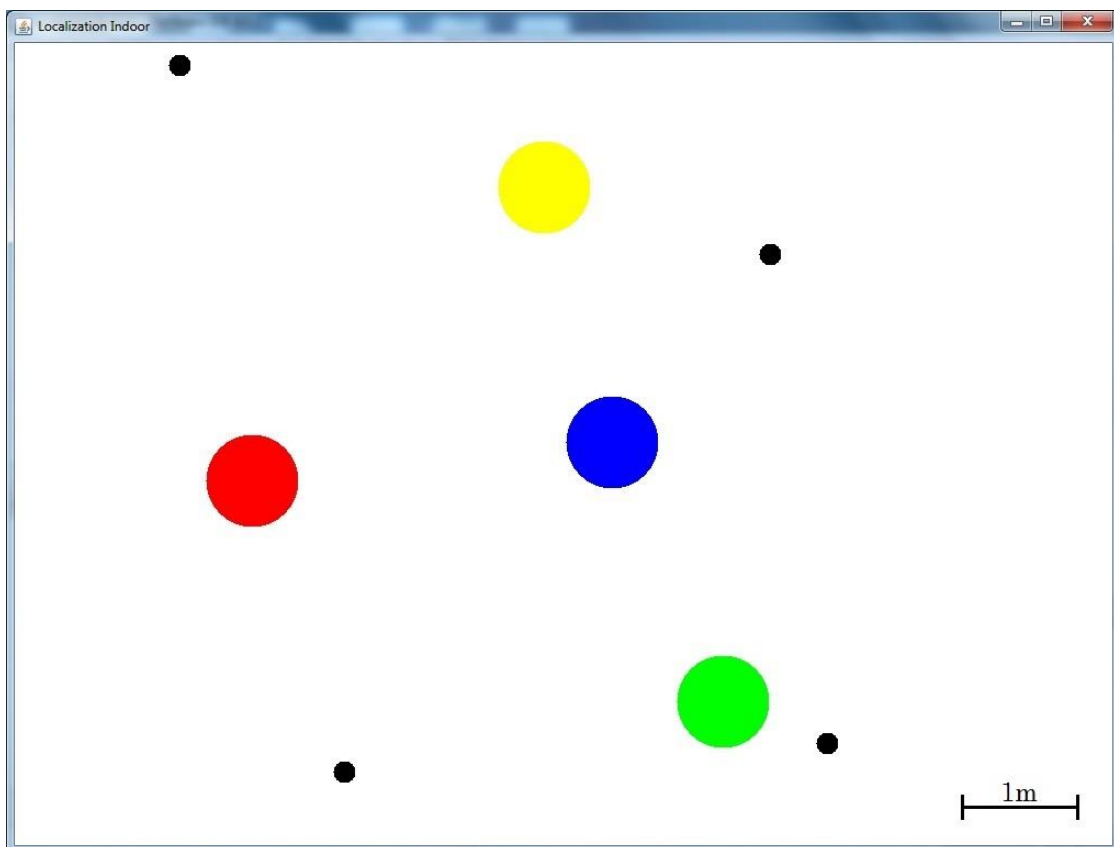


Figura 6.5: Versão final da janela da aplicação.

O centro dos círculos coloridos é determinado pelo algoritmo desenvolvido, discutido anteriormente, não se desenhando os anéis e circunferências que se observam na figura 6.4, usados numa primeira fase para testar a validade das medidas e do algoritmo. O respetivo raio é estabelecido pelo erro associado às medidas de distância recolhidas, erro este que será explicado quando analisado o desempenho do sistema na secção 2 do capítulo 7.

No ensaio real do sistema, foi necessário realizar o mapeamento do espaço onde se realizaram as medições (na sala de *hardware* da Micro IO), para definir na aplicação a localização absoluta dos nós fixos.

A atualização da localização dos móveis é feita à taxa de 2Hz. Sabendo que os nós fixos enviam tramas *WiFi* a uma taxa de 4Hz, isto é, ao dobro da taxa de atualização do desenho da aplicação, é feita uma média a cada 2 amostras de distâncias indicadas pelos nós fixos. A posição também só é atualizada quando se verifica um deslocamento superior ao erro máximo das medidas. Estes procedimentos são realizados de forma a otimizar o desempenho do sistema.

6.3 Sumário

Neste capítulo descreveram-se todos os aspetos relacionados com o desenvolvimento efetuado, a nível de *hardware* e *firmware*, para implementação do sistema de localização para espaços interiores proposto no âmbito da presente dissertação. A posição estimada pelo sistema é representada num mapa 2D por uma aplicação desenvolvida para o efeito.

7. Validação do Sistema de Localização: Testes e Resultados

Neste capítulo são apresentados e discutidos os ensaios realizados para avaliação desempenho do sistema de localização desenvolvido. Também é realizada uma análise à autonomia do nó móvel, uma característica importante neste tipo de sistema, com base em medições da corrente consumida, bem como pelo tempo de funcionamento do dispositivo sem necessidade de mudar ou carregar a bateria.

7.1 Análise das medidas realizadas

Para analisar a precisão e exatidão do sistema, colocou-se o nó móvel a várias distâncias (conhecidas à partida) de um nó fixo, a partir do qual se adquiriram amostras com o objetivo de realizar uma análise do desempenho do sistema desenvolvido. Utilizou-se uma fita métrica para definir as distâncias.

Os testes foram realizados em condições LOS e NLOS, recorrendo-se a uma parede de betão e colocando o nó móvel entre a parede e o nó fixo, já que esta simulação de ambiente NLOS é aquela em que se verificou uma maior atenuação do sinal, diminuindo o alcance do nó fixo ao móvel e a precisão do valor de distância calculado.

A figura 7.1 representa as condições em que foram realizados os testes.

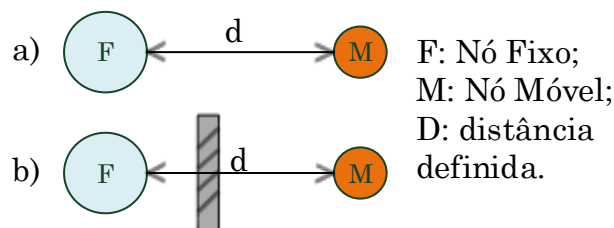


Figura 7.1: Ensaios LOS em a) e NLOS em b).

De seguida apresentam-se gráficos da distribuição real das amostras medidas (a cada distância e em condição LOS/NLOS) comparativamente com a distribuição normal que se obtém através do cálculo da média e do desvio padrão.

Foram retiradas amostras de distância durante 15s à taxa de 4 Hz para as distâncias de 50cm LOS, 150cm LOS, 300cm LOS, 700cm LOS, 1200cm LOS, 200cm NLOS e 500cm NLOS.

Observando a figura 7.2, verifica-se que a distribuição real aproxima-se bastante da distribuição normal o que significa que o sistema manifestou uma

precisão elevada para este ensaio. Calculou-se uma média de 57,1cm e um desvio padrão de 1,4cm. Um erro máximo é de 10cm e um desvio em relação à média de 7,1cm comprovam a exatidão do sistema considerando o valor real de 50cm.

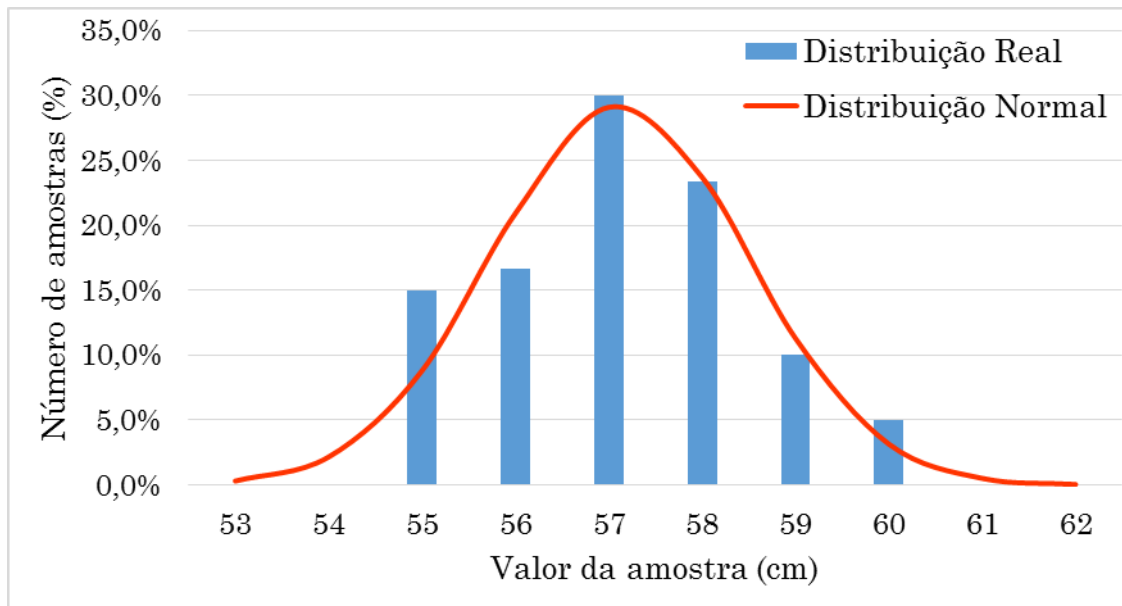


Figura 7.2: Distribuição real vs. distribuição normal (50cm LOS).

Pela observação do gráfico representado na figura 7.3, constata-se que a distribuição real aproxima-se bastante da distribuição normal tal como no ensaio da figura 7.2. Calculou-se uma média de 175,7cm e um desvio padrão de 1,9cm. O erro máximo é de 30cm e o desvio em relação à média é de 25,7cm, constatando-se uma pequena diminuição da exatidão do sistema para este ensaio.

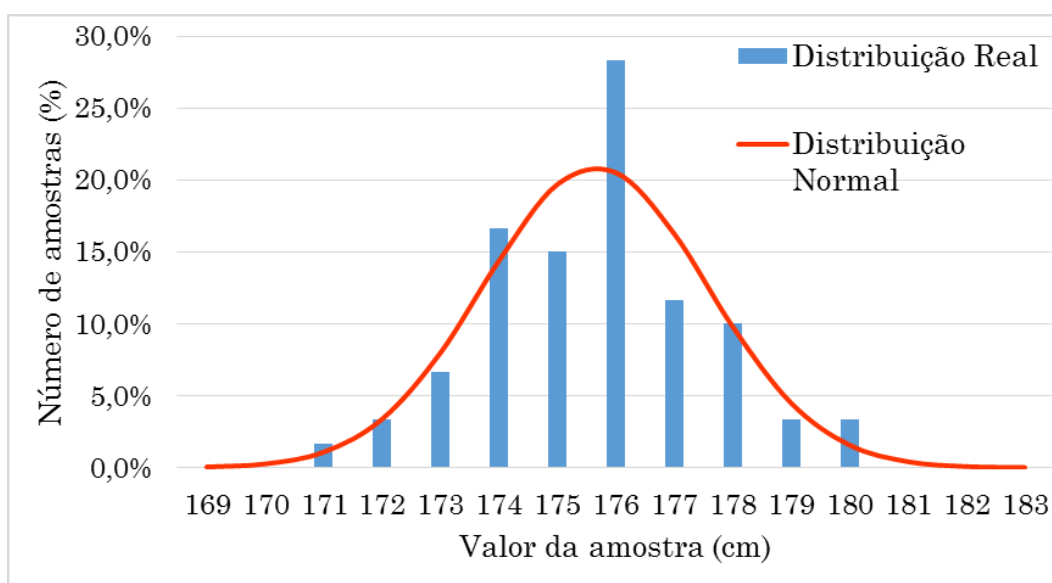


Figura 7.3: Distribuição real vs. distribuição normal (150cm LOS).

Observando a figura 7.4, verifica-se que a distribuição real aproxima-se da distribuição normal tal como nos ensaios 50cm LOS e 150cm LOS. Calculou-se uma média de 323,7cm e um desvio padrão de 2,3cm. O erro máximo é de 28cm e o desvio em relação à média é de 23,7cm, sendo assim a exatidão do sistema idêntica ao ensaio 150cm LOS.

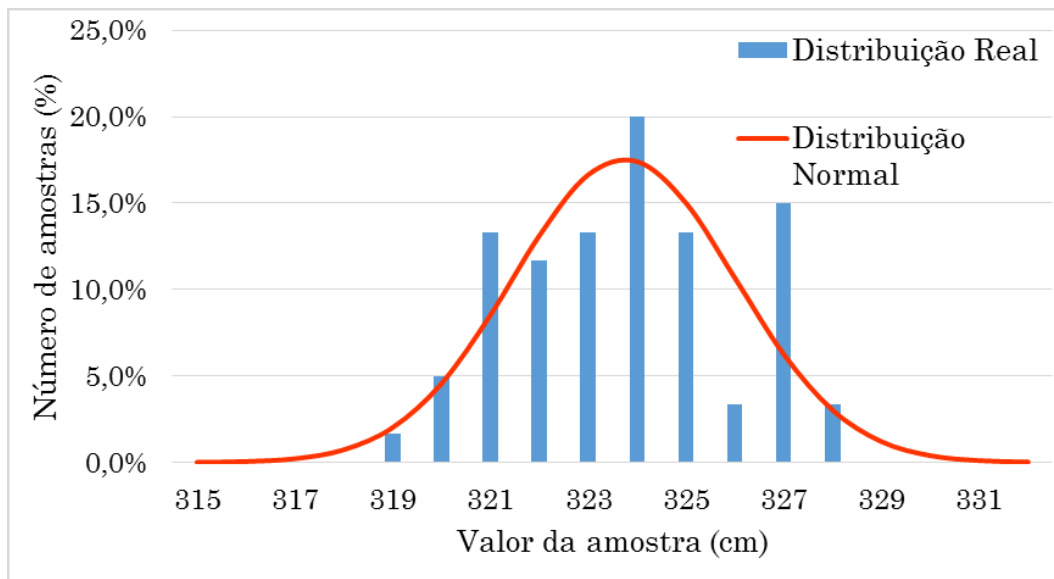


Figura 7.4: Distribuição real vs. distribuição normal (300cm LOS).

Analisando o gráfico da figura 7.5, observa-se que a distribuição real aproxima-se da distribuição normal tal como nos ensaios anteriores e por isso o sistema apresentou elevada precisão para este ensaio.

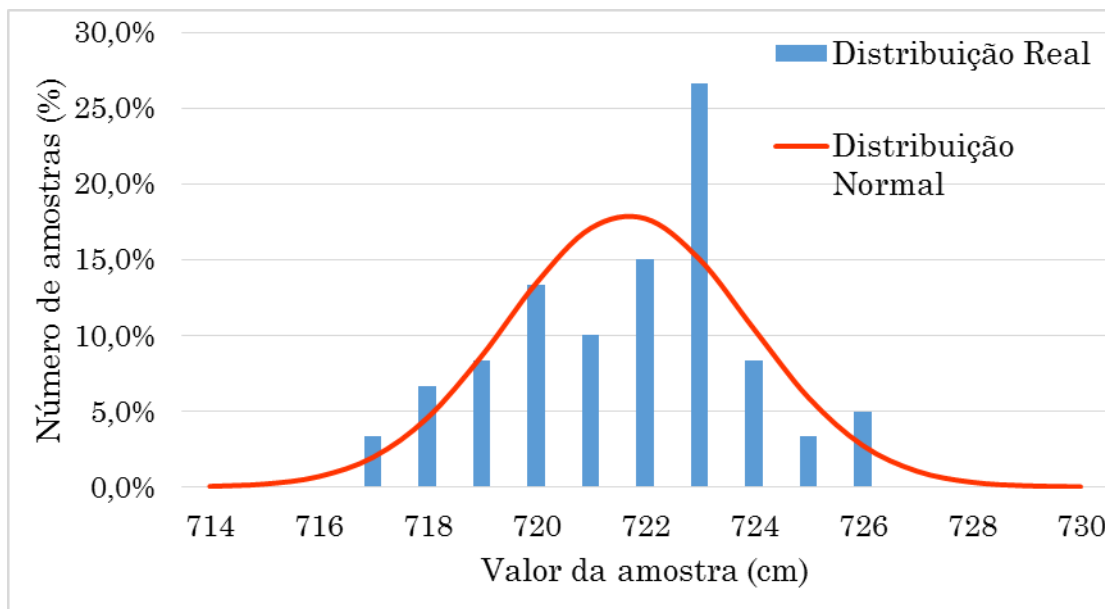


Figura 7.5: Distribuição real vs. distribuição normal (700cm LOS).

Calculou-se uma média de 721,7cm e um desvio padrão de 2,2cm. O erro máximo é de 26cm e o desvio em relação à média é de 21,7cm, verificando-se que o sistema apresenta uma exatidão na mesma ordem de grandeza daquela que foi constatada nos ensaios 150cm LOS e 300cm LOS.

Observando o gráfico da figura 7.6, verifica-se uma redução notória na precisão do sistema já que a distribuição real se desvia da distribuição normal. Calculou-se uma média de 1212,7cm e um desvio padrão de 17,9cm. O erro máximo é de 57cm e o um desvio em relação à média é de 12,7cm, verificando-se que o sistema apresenta uma melhoria na exatidão em relação aos outros ensaios em LOS.

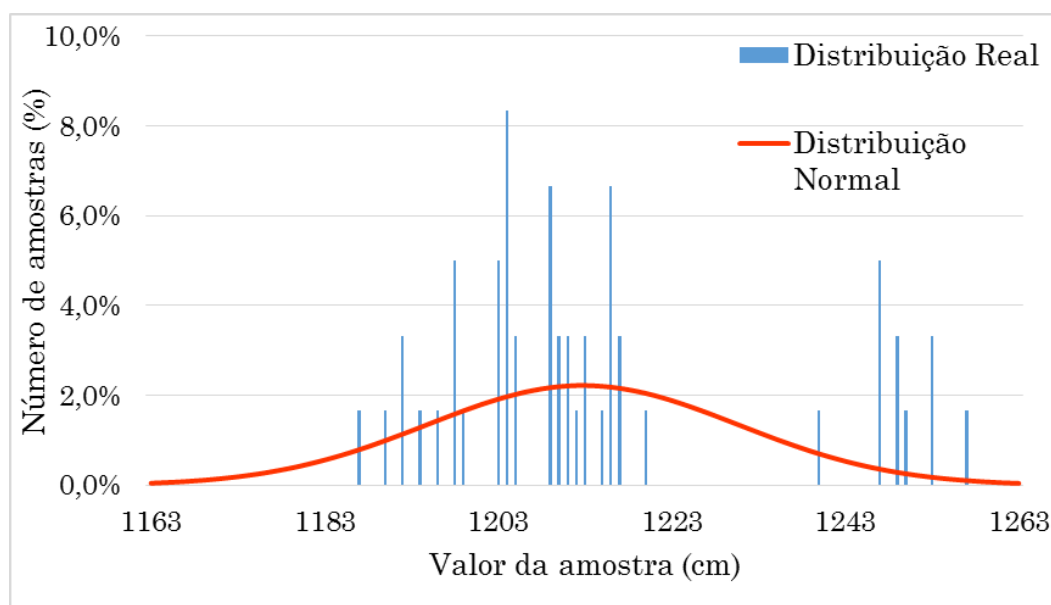


Figura 7.6: Distribuição real vs. distribuição normal (1200cm LOS).

Ao realizar testes de campo para distâncias próximas deste valor, nomeadamente para 11 e 13m, verificou-se que para os 11m o sistema ainda apresentava uma precisão idêntica aquela que se observou nas figuras 7.2, 7.3, 7.4 e 7.5, mas que para distâncias superiores a 13m a precisão diminuía drasticamente e as falhas de comunicação engobavam mais de 50% das amostras. Para uma distância de 14m verificou-se que o nó móvel perde conectividade com o nó fixo, sendo por isso, o valor de distância a que corresponde o alcance máximo do sistema.

Contudo, para valores de distância retirados nas proximidades entre os 12 e os 14m, a precisão e exatidão do sistema é mais reduzida e por isso, colocando os nós fixos separados no máximo de 12m, garante-se um desempenho adequado do sistema.

O gráfico da figura 7.7 foi efetuado com amostras de medidas retiradas à distância de 200cm com uma parede de betão entre o nó móvel e o nó fixo para simular a condição NLOS que mais degrada a precisão e o alcance do sistema,

parâmetros essenciais na avaliação do seu desempenho. Observa-se que a distribuição real aproxima-se da distribuição normal o que significa que o sistema apresentou uma precisão elevada para este ensaio. Calculou-se uma média de 245,2cm e um desvio padrão de 1,6cm. O erro máximo é de 48cm e o desvio em relação à média é de 45,2cm comparativamente com o valor real de 200cm, verificando-se que a exatidão do sistema é menor do que nos ensaios em LOS.

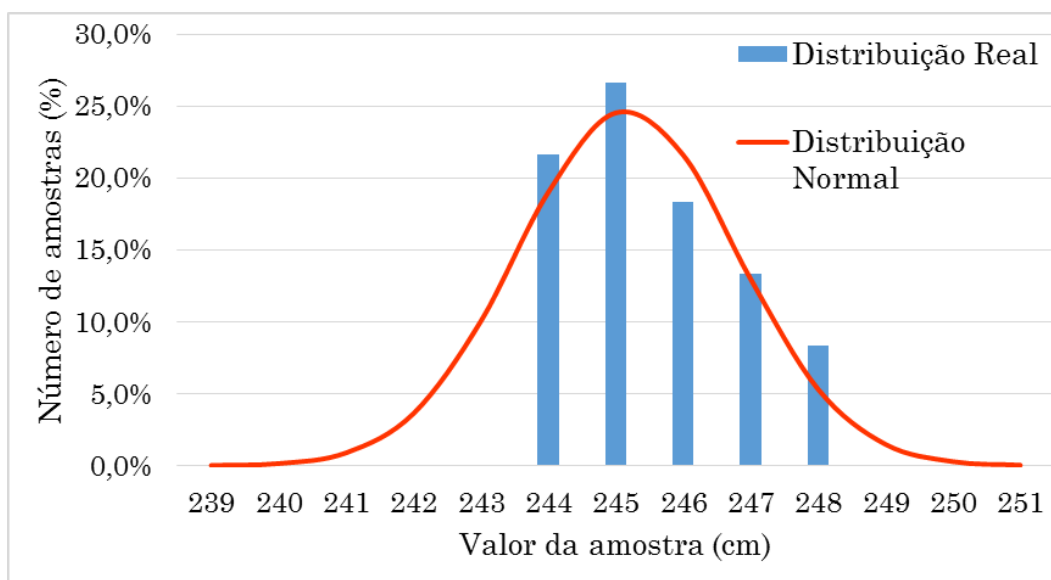


Figura 7.7: Distribuição real vs. distribuição normal (200cm NLOS).

O gráfico da figura 7.8 foi realizado nas mesmas condições do gráfico anterior 7.7, aumentando-se a distância entre o nó móvel e o nó fixo para 500 cm.

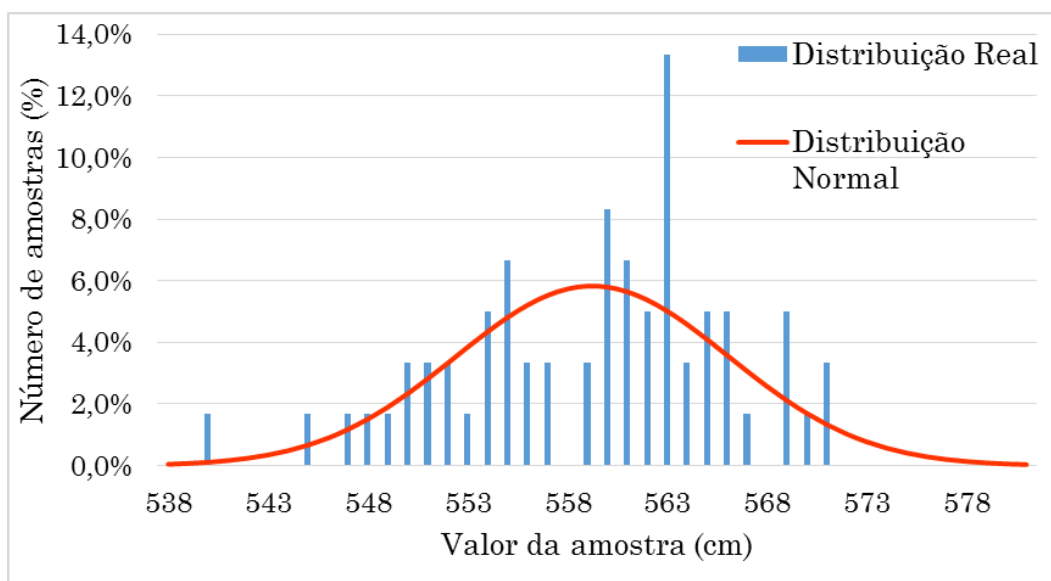


Figura 7.8: Distribuição real vs. distribuição normal (500cm NLOS).

Analisando o gráfico da figura 7.8, constata-se que a distribuição real aproxima-se da distribuição normal tal como no ensaio 200cm NLOS. Calculou-se uma média de 559,3cm e um desvio padrão de 6,8cm. O erro máximo é de 71cm e o desvio em relação à média é de 59,3cm, constatando-se que a exatidão verificada pelo sistema neste ensaio é menor que no ensaio 200cm NLOS representado na figura 7.7.

Ao realizar testes de campo nas mesmas condições das figuras 7.7 e 7.8, notou-se que para valores até 5m o sistema apresenta um desempenho idêntico. Verificou-se que 7m é o alcance máximo do sistema para a condição NLOS considerada, dado que para uma distância de 7m o nó móvel perde conectividade com o nó fixo. No entanto, para valores de distância retirados nas proximidades entre os 6 e os 7m, a precisão e exatidão do sistema é mais reduzida e por isso, colocando os nós fixos separados no máximo de 6m, garante-se um desempenho adequado do sistema em condições NLOS bastante adversas.

Apresenta-se seguidamente uma tabela de resumo, tabela 7.1, considerando os gráficos analisados nesta subsecção.

Tabela 7.1: Resultados do ensaio do sistema.

Distância definida (cm)	50 LOS	150 LOS	300 LOS	700 LOS	1200 LOS	200 NLOS	500 NLOS
Média	57,1	175,7	323,7	721,7	1212,7	245,2	559,3
Desvio Padrão	1,4	1,9	2,3	2,2	17,9	1,6	6,8
Erro Máximo (%)	20,0	20,0	9,3	3,7	4,8	24,0	14,2
Desvio em relação à média (%)	14,2	17,1	7,9	3,1	1,1	22,6	11,9

Analisando a tabela verifica-se que o sistema apresenta um pequeno desvio em relação à média (entre 7,1cm e 25,7cm) dos valores estimados em LOS comparativamente com valor real definido. Esse desvio aumenta em condições NLOS, verificando-se um valor de 59,3cm no ensaio de 500cm que correspondem a um desvio em relação à média de 11,9%.

Calculou-se a percentagem de desvio em relação à média e de erro máximo às várias medidas definidas, obtendo-se os valores de 11,1% e 13,7%, respetivamente. Conclui-se que o desvio em relação à média e erro máximo do sistema diminuem em percentagem com o aumento da distância entre o nó fixo do nó móvel. O desvio padrão baixo das amostras de distância comprova a precisão elevada do sistema. Contudo, o desvio padrão tende a aumentar nas proximidades da distância que corresponde ao alcance máximo em LOS e NLOS, o que significa que o sistema perde precisão nesses cenários.

Conclui-se também que a exatidão do sistema é mais elevada para cenários em LOS comparativamente com cenários em NLOS, registando-se um valor de erro máximo de 71cm (14,2%) para o caso 500cm NLOS. Para as diversas

distâncias em LOS (para a qual se avaliou o desempenho do sistema) inferiores a 10m, verifica-se uma exatidão superior a 30cm. Perante estes resultados, cumpriu-se o objetivo proposto de atingir uma localização com um erro inferior a 1m.

7.2 Análise gráfica do ensaio do sistema

Ao ser realizado um ensaio do sistema, colocou-se 4 nós fixos espaçados de no máximo 800cm, e utilizou-se a aplicação desenvolvida para observar a posição no espaço, verificou-se que a estimativa da posição real apresentava um erro igual ou inferior a 35cm como será explicado na análise através da análise da figura da aplicação. O ambiente considerado nos ensaios é do tipo NLOS, apresentando vários objetos, como mesas, cadeiras, monitores, inúmeros dispositivos eletrónicos, entre outros, que podem atenuar, refratar ou refletir os sinais UWB. Este espaço utilizado para ensaio não apresenta paredes de betão entre os móveis e os fixos, à exceção de uma pilar quase quadrado com aproximadamente 50cm por 50cm de lado, próximo de um nó fixo. Verificou-se que o erro máximo do sistema é inferior a 35cm, à exceção das proximidades do pilar onde o erro se verificou inferior a aproximadamente 50cm.

Pode-se considerar que maioria das amostras o erro máximo das medidas de distâncias usadas para traçar a localização dos nós móveis é igual ou inferior 30cm, até porque, afinando-se futuramente de forma mais aprimorada o sistema e recorrendo a filtros e ajustes na aplicação, pode-se reduzir o desvio verificado nos gráficos da secção 7.1.

Pelo exposto, e observando os anéis representados na figura 7.9 que tem uma espessura de 60cm convertidos para a escala do desenho, dado que o erro máximo é de ± 30 cm face à análise realizada na secção 7.1, especificou-se na aplicação o desenho de um círculo, com um raio tal que cobrisse a região de intersecção dos anéis correspondente à localização do nó móvel em questão, tal como explicado na secção 6.2.4. Verificou-se que essa região era coberta por um círculo de raio de 35cm que corresponde, portanto, à exatidão mínima garantida pelo sistema, isto é, a diferença entre a posição real e a posição estimada é de no máximo 35cm.

Durante a realização do ensaio, também se constatou, estando 4 nós móveis ativos, que mais de 99% das amostras recebidas eram válidas. Registou-se um máximo de 5 amostras perdidas quando se ativam os nós móveis e se inicia a localização, altura em que os nós móveis estabelecem a sua janela de tempo, procedimento explicado na secção 5.4. Assim, comprova-se a eficiência dos procedimentos seguidos e explicados na secção 5.4 relativos ao múltiplo acesso.

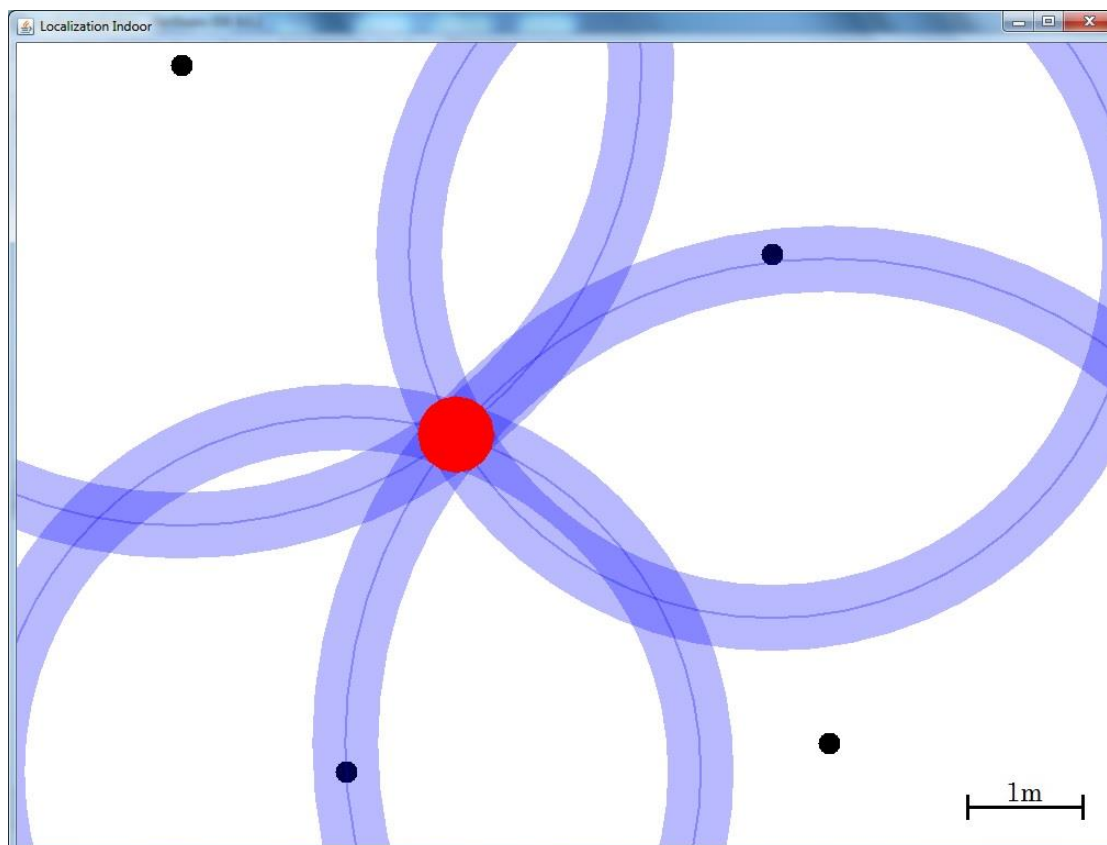


Figura 7.9: Janela da aplicação.

7.3 Autonomia do nó móvel

Teoricamente, a corrente máxima consumida pelo nó móvel seria 188,4mA, sendo 15mA correspondentes ao microcontrolador com o relógio configurado para 64MHz [46], 13,4mA consumidos pelo DWM1000 quando está ativo, que se pode encontrar no manual em “*Supply current IDLE mode*” [29] e por último, 160mA quando o DWM1000 transmite ou recebe tramas através do canal 5 que pode ser consultado também no manual em “*RX : 3.3 V supplies*” [29].

Para avaliar a corrente consumida pelo nó móvel, mediu-se de tensão aos terminais de uma resistência conectada entre a bateria e a tensão de alimentação do circuito do nó móvel, determinando a corrente pela lei de Ohm ($I=V/R$). Recorreu-se ao Matlab [51] para traçar os gráficos de corrente devido ao número elevado de amostras guardadas num formato .csv (*comma separated values*).

A figura 7.10 representa o perfil corrente consumido pelo nó móvel numa posição fixa e em linha de vista para os 4 nós fixos com quem estabelece comunicação. Observa-se que o consumo máximo não atinge os 180mA, aproximando-se do teórico previsto de 188,4mA. Verifica-se claramente os períodos de tempo em que o nó móvel entra em modo de poupança de energia (corrente próxima de 0, aproximadamente de 35 μ A medidos), que corresponde à subtração do período de atualização de localização de 250ms (4 Hz), pelo tempo em que o móvel estabelece o TWRS com os 4 nós fixos, de 54ms, mencionado no tópico fluxogramas da secção 6.2.1.

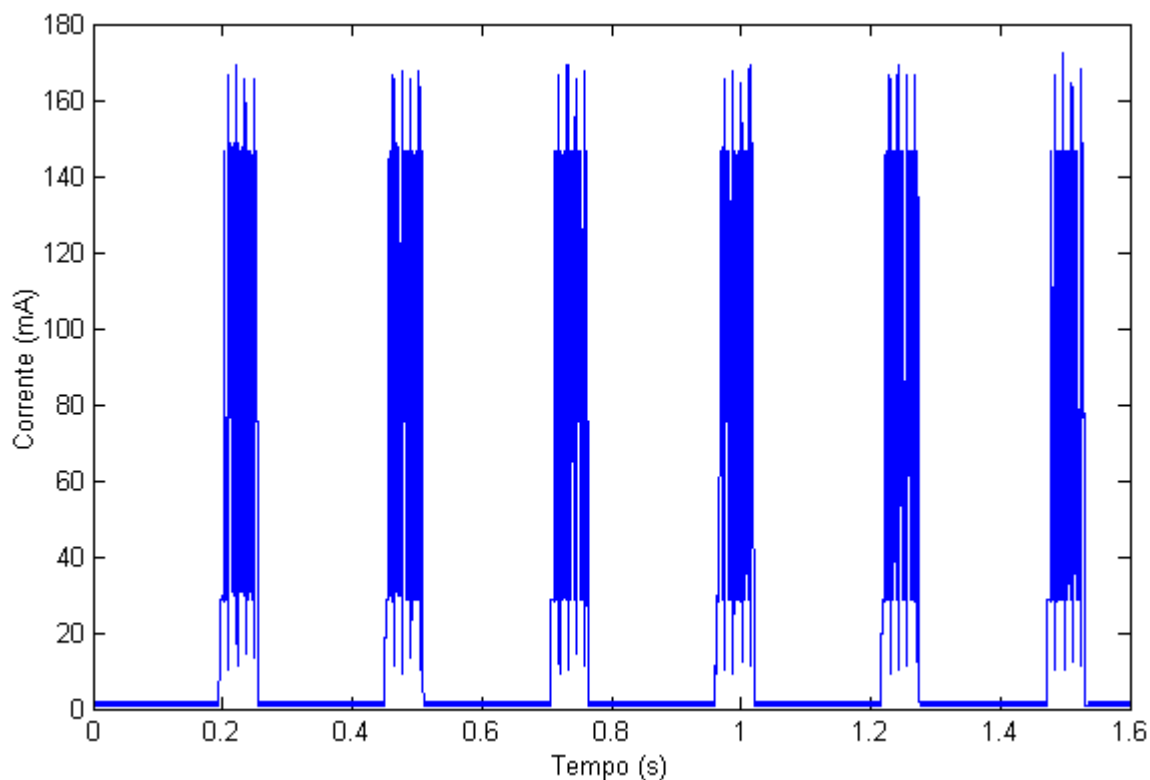


Figura 7.10: Consumo energético do nó móvel.

Constata-se também, que existe um pequeno desvio no período de atualização de localização, de 250ms, já que foi preciso ligeiramente mais do que 1s para tirar 4 amostras. Este pequeno desvio está relacionado com a frequência configurada para o temporizador que é responsável por gerar este evento.

A figura 7.11 representa de forma ampliada, o perfil de consumo de corrente do nó móvel, quando este executa o TWRS com os 4 nós fixos.

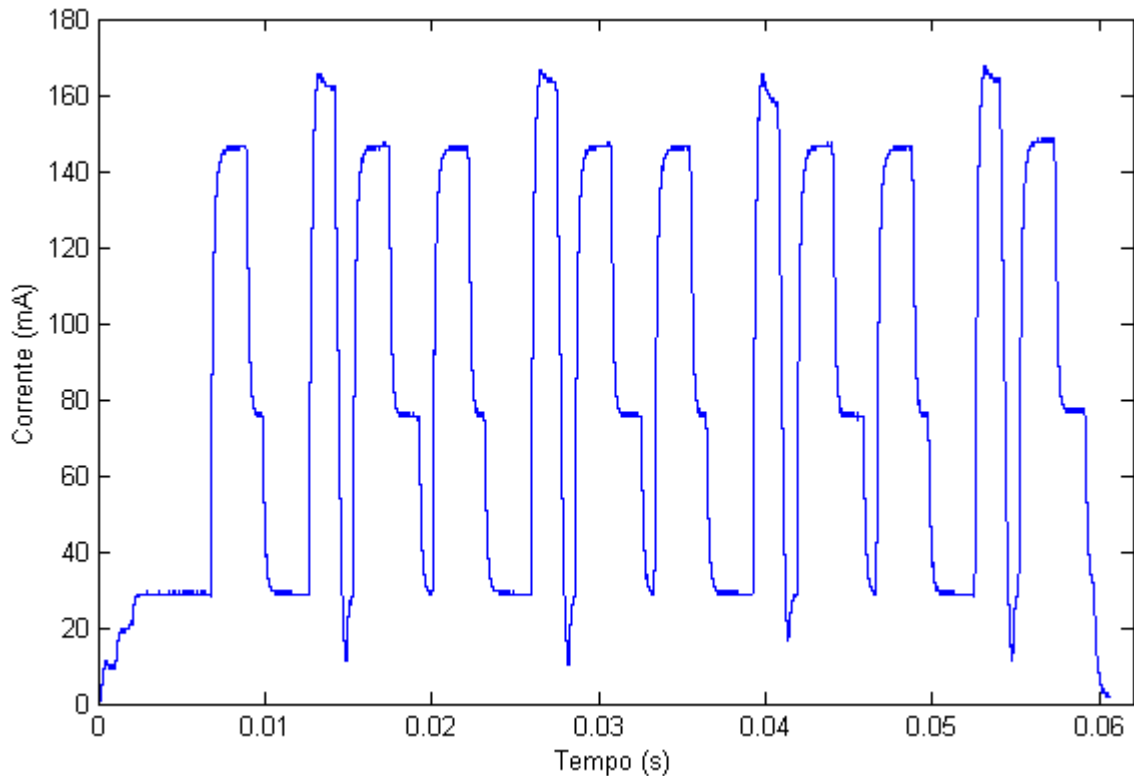


Figura 7.11: Consumo energético do nó móvel ampliado no intervalo de tempo de comunicação.

Notam-se 12 picos correspondentes às 12 mensagens trocadas, 3 com cada nó fixo, dos quais os 4 picos de valor mais elevado correspondem à receção da mensagem de resposta (consultar secção 5.2). Verificam-se também, observando-se os pequenos degraus perto de 80mA, que as transmissões com um tamanho maior para o campo de dados, no caso da mensagem final, demoram mais tempo a enviar, tal como seria de prever. Confirma-se o tempo aproximado total da comunicação, de 54ms, mais os 5ms iniciais para que o dispositivo esteja pronto a transmitir.

Observa-se que o perfil das transmissões e receções está de acordo com os perfis de transmissão e receção do DWM100 [30], sabendo na figura 7.10 vem adicionados o consumo do microcontrolador e o consumo estático do próprio DWM1000 quando ativo.

Com base na figura 7.10, dado que o perfil ampliado da figura 7.11 se mostra de acordo com o teórico esperado, apresentando valores de corrente próximos dos previstos, calculou-se uma média do consumo de corrente para o nó móvel, obtendo-se um valor de 5.39mA.

A figura 7.12 representa o consumo de corrente do nó móvel numa posição do espaço que apresenta uma conectividade bastante reduzida aos nós fixos, verificando-se o procedimento de retransmissões abordado na secção 5.4.

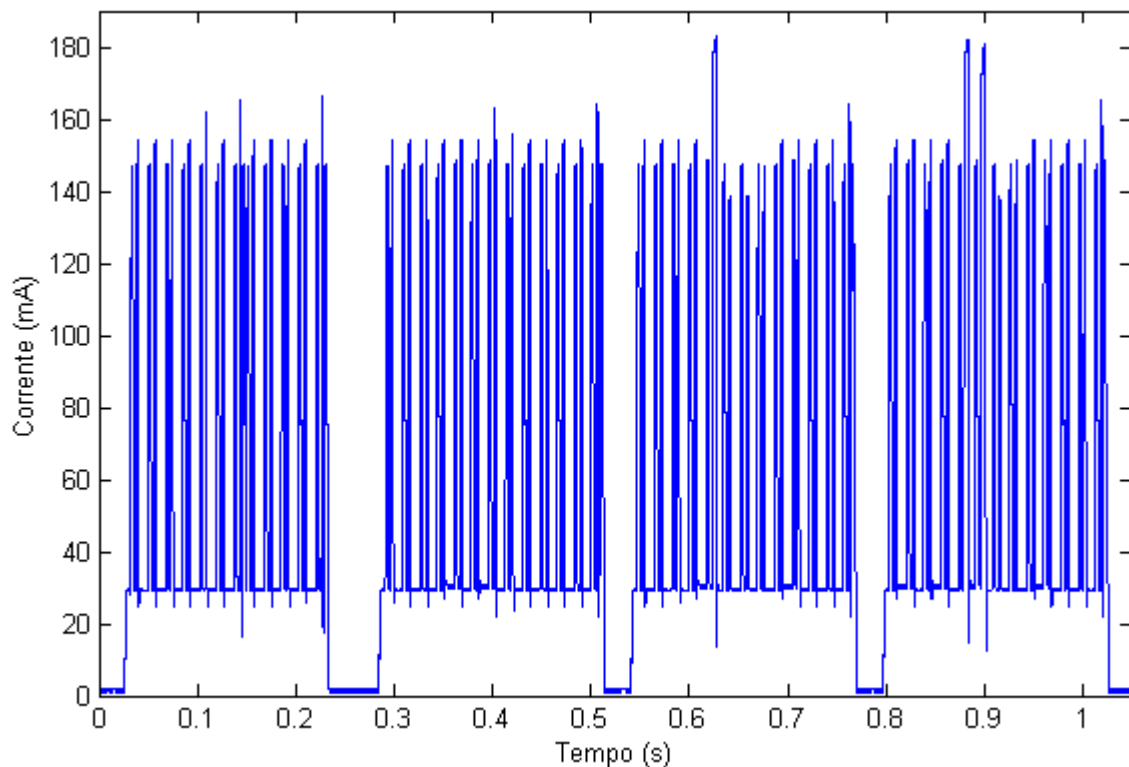


Figura 7.12: Consumo energético do nó móvel com retransmissões.

De seguida utilizou-se o Wireshark [52], colocando o sistema em funcionamento e ativando um nó móvel com uma bateria carregada (4,2V), para capturar os pacotes *WiFi* na rede enviados pelos nós fixos, com o objetivo de determinar a duração da bateria do móvel.

Apontou-se a data e hora do início do ensaio, 31 de Agosto às 20h:19min, e deixou-se o sistema em funcionamento, e um computador ligado, configurado com o IP 192.168.1.100 (correspondente ao IP anfitrião configurado nos módulos *WiFi*). Verificou-se, que o último pacote foi recebido dia 1 de Setembro à 1h:38min, tal como se verifica na figura 7.13 na zona assinalada a vermelho. Calculou-se o tempo decorrido desde que o nó móvel foi ativado até à falhar a comunicação, de 5 horas e 19 minutos, que corresponde a autonomia do nó móvel. Confirmam-se os IPs, portas remotas e protocolo, configurados nos módulos *WiFi* pela região identificada a laranja na figura 7.13. Observa-se também o formato das tramas, mencionado na figura 5.5 da secção 5.2, que se identifica na figura 7.13 a verde.

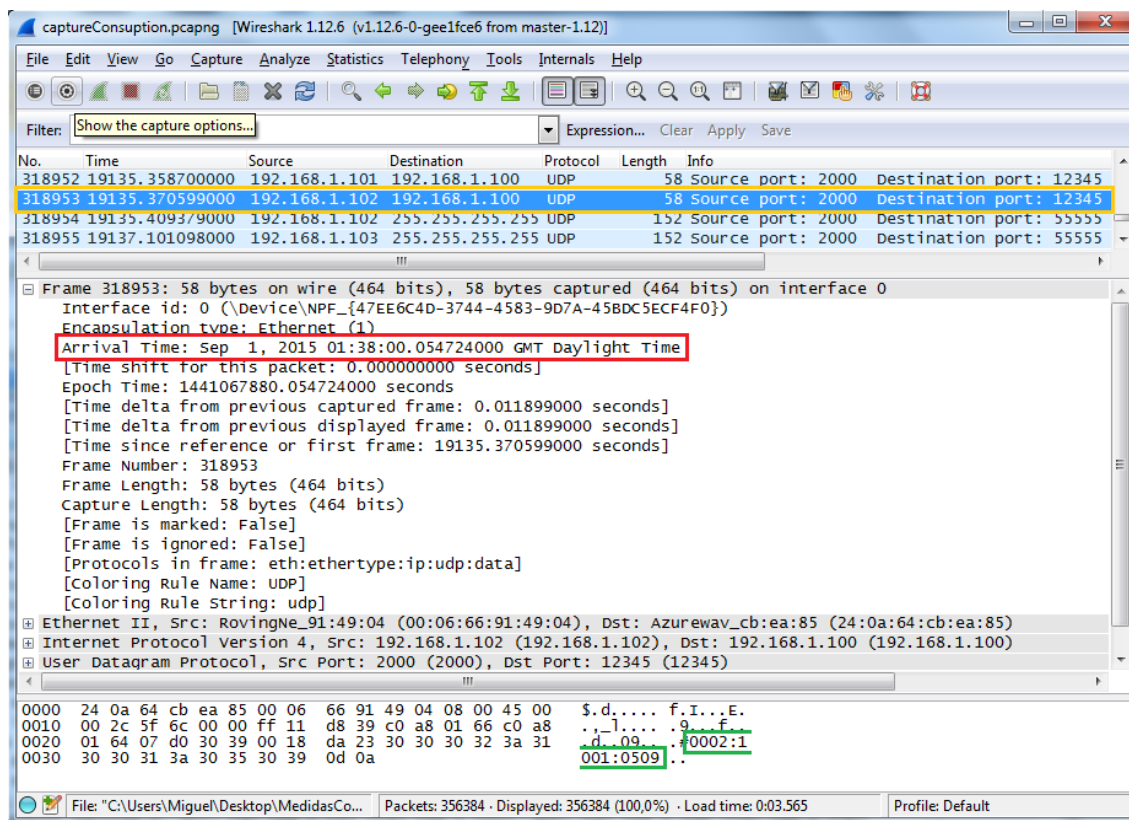


Figura 7.13: Captura do Wireshark.

À partida achou-se que a autonomia medida, 5 horas e 19 minutos, era curta ao realizar-se um cálculo simples da capacidade total da bateria LIR 2450, de 120mAh a dividir pela corrente média consumida determinada, de 5,39mA, resultando numa autonomia de 22h próxima da pretendida.

Considerando a análise anterior mediu-se a bateria depois do teste registando-se um valor de 3,79V. Considerando este valor percebeu-se que a tensão de alimentação da bateria não seria a causa que levaria à falha de comunicação do nó móvel mais cedo do que o esperado. Confirmou-se esta premissa, ao alimentar o nó móvel com uma corrente limitada a 200mA, recorrendo a fonte de alimentação digital regulável. Reduziu-se a tensão desde os 4,2V, que correspondem à tensão da bateria carregada, até que houvesse falha na comunicação, registando-se um valor de 3,3V, valor mínimo de tensão para o bom funcionamento do nó móvel.

Neste contexto, concluiu-se que, a partir de um certo momento, a corrente que a pilha era capaz de fornecer não era suficiente para que o nó móvel realizasse a comunicação, nomeadamente para suportar os picos na receção (verificados na figura 7.11). Assim, decidiu-se analisar o perfil da bateria escolhida (corrente em função da tensão), traçando-se o perfil aproximado da bateria com base na tabela “*Basic Characteristics*” presente em [45], que se pode observar na figura 7.14.

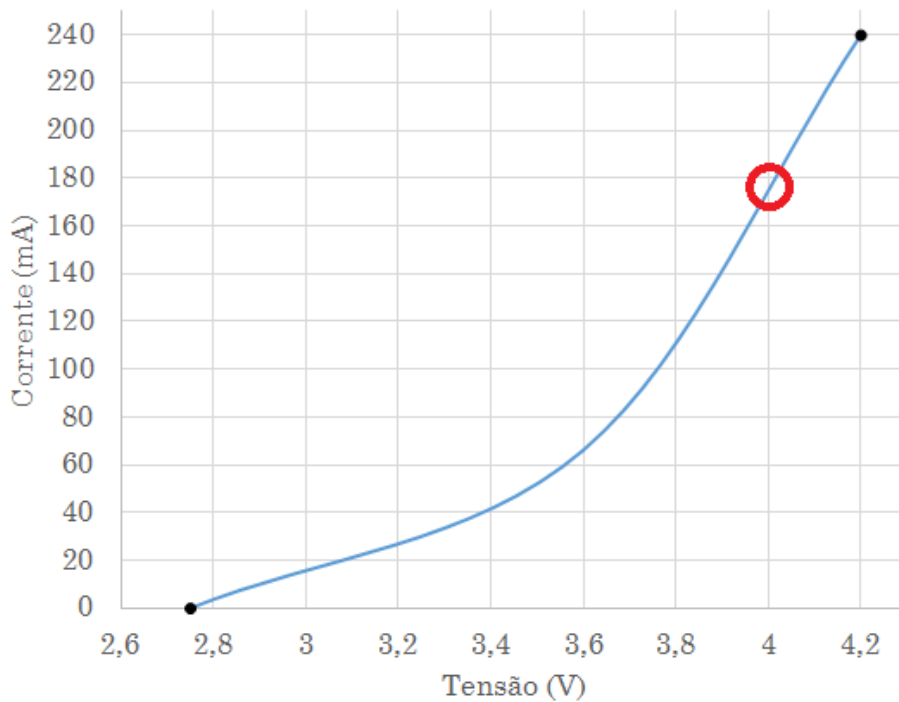


Figura 7.14: Perfil aproximado da bateria LIR2450.

Na figura 7.14 desenhou-se uma circunferência a vermelho, que corresponde à região do gráfico em que a corrente é ligeiramente superior a 170mA, corrente necessária para suportar os picos verificados na receção, analisados através da observação da figura 7.11. Assim, pode-se verificar que quando a pilha baixa dos 4V já não disponibiliza corrente suficiente para o correto funcionamento do nó móvel. Analisando a figura 7.15, que representa o perfil de descarga característica a várias correntes da pilha LIR450, nota-se que a descarga da bateria é quase linear nas proximidades dos 4V, verificando-se um decaimento mais acentuado da descarga quando a tensão atinge os 3,5V.

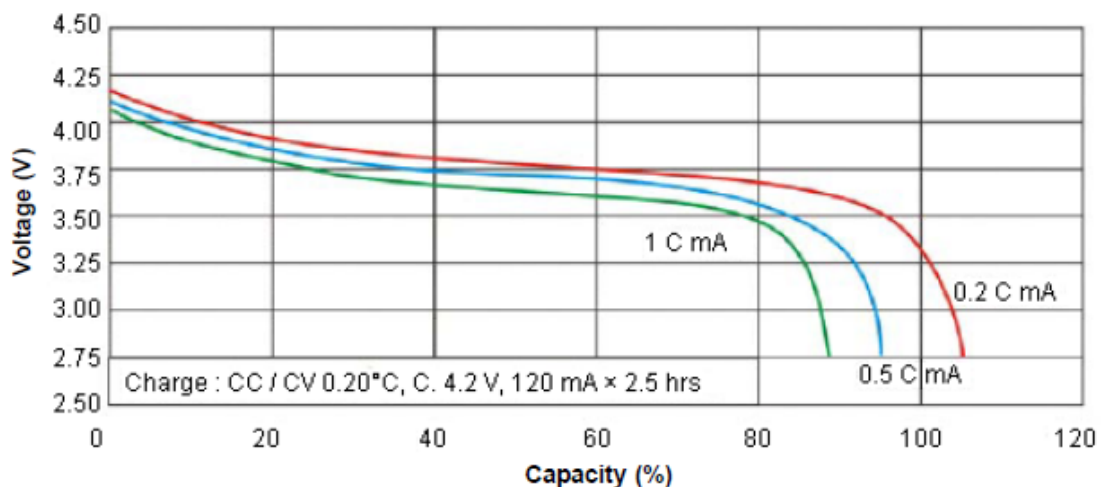


Figura 7.15: Perfil de descarga característica da bateria LIR2450. [45]

Deste modo, considerando uma a corrente média calculada com base no gráfico da figura 7.10, de 5,39mA e considerando o perfil de descarga da pilha, sabendo que a corrente considerada calculada corresponde a 0,045 C (pois 1C corresponde a 120mA), podiam-se traçar, imaginariamente 2 linhas acima da linha vermelha respeitando a tendência do gráfico, uma a metade de 0,2C, que é 0,1C, e a outra a 0,05C, metade deste e valor e próximo dos 0,045C.

Portando, sendo bastante otimista, o nó móvel só ira funcionar até a bateria atingir os 25% da sua capacidade total de 120mAh, isto é, 30mAh, e com este valor pode-se estimar o valor prático de corrente consumida a partir do tempo medido no Wireshark, $30\text{mAh} / 5\text{h } 19 \text{ min} = 5,64\text{mA}$.

Concluindo, prova-se que os valores, 5.39mA obtido pela média do gráfico 7.10 e 5,64mA determinados na análise anterior, são próximos, e neste contexto, a autonomia determinada para o nó móvel é válida.

A autonomia do nó móvel é, assim, de 5h e 19min para uma taxa de atualização da posição estimada de 4 Hz. Logo para uma taxa de 1 Hz prevê-se uma autonomia de 21h e 16min, um valor próximo do objetivo proposto de 24h quando o sistema se encontra em funcionamento com a taxa de atualização citada, a taxa de atualização mínima adequada para sistemas RTLS.

7.4 Sumário

Neste capítulo descreveram-se as experiências realizadas para testar o desempenho do sistema. Constatou-se que o sistema apresenta uma exatidão e precisão adequadas para a localização em espaço interior cumprindo o objetivo proposto de obter uma posição estimada com um erro inferior a 1m.

Também se realizou uma análise gráfica baseada na aplicação desenvolvida que representa a localização em 2D, deduzindo-se um erro de localização inferior a 35cm.

Analisou-se o consumo do nó móvel prevendo-se uma autonomia de 21h e 16min para uma taxa de atualização da localização de 1 Hz, verificando-se que para aplicações futuras do sistema existe a necessidade de se optar por uma bateria com mais capacidade que permita suportar os picos de corrente nas transmissões e receções durante mais tempo, por forma a aumentar a autonomia do nó móvel.

8. Conclusões e Trabalho Futuro

8.1 Conclusões

Através dos recursos disponibilizados pela Micro IO foi possível desenvolver um sistema de localização para espaços interiores que cumpre os objetivos propostos no início da presente dissertação. O ensaio do sistema revelou, de facto, um bom desempenho, exibindo apenas uma autonomia relativamente baixa (respetiva ao nó móvel), considerando a autonomia que se pretendia atingir, explicando-se por isso no trabalho futuro, as medidas a tomar relativamente a este ponto.

Conseguiu-se comprovar o potencial da tecnologia UWB, utilizando um esquema de medição de tempos de propagação dos sinais, determinando as distâncias aos nós localizadores.

8.2 Trabalho Futuro

Considerando o ensaio do sistema, após o desenvolvimento dos protótipos de *hardware* do nó móvel e do nó fixo, e do respetivo *firmware*, bem como da aplicação que representa num mapa a localização estimada, provou-se a sua funcionalidade e desempenho, existindo porém, alguns aperfeiçoamentos a realizar de forma a conceber um produto de inovação no mercado.

Relativamente ao *hardware*, é necessário a opção por uma bateria mais apropriada para o nó móvel, com uma capacidade e um perfil de descarga adequados para suportar os picos de corrente verificados nas transmissões e receções, prolongando a sua autonomia de aproximadamente 21h. A idealização e elaboração do *design* do nó móvel também é um processo importante para chegar a um produto final. Formatos como uma pulseira ou caneta de colocar ao peito podem ser adotados por serem facilmente transportáveis, requerendo uma adaptação do *hardware*, sobretudo ao nível das suas dimensões.

Ao nível de *firmware*, a adoção de medidas para reduzir o consumo energético do nó móvel, mostra-se conveniente de forma a aumentar a sua autonomia. Assim, reduzindo a velocidade de relógio do microcontrolador, mas de forma a garantir uma taxa de atualização de acordo com a aplicação pretendida, é possível reduzir consumo energético do nó móvel. Para além disso, pode-se implementar *firmware* para realizar “sonecas” quando o DWM1000 está em espera de mensagens até ativar o recetor, isto é, o DWM1000 permanece ativo mas num modo de consumo energético mais moderado, dado que não é favorável colocar este módulo no estado de poupança de energia pois são necessários cerca de 5ms até estar apto a

transmitir/receber. Ainda considerando o *firmware*, a realização de diversos testes de campo em diferentes cenários é importante para ajustar os parâmetros do algoritmo do DWM1000, que estima o tempo de chegada dos sinais UWB (*Control Leading Edge and Diagnostics*, LDE), de acordo com as necessidades da aplicação requerida.

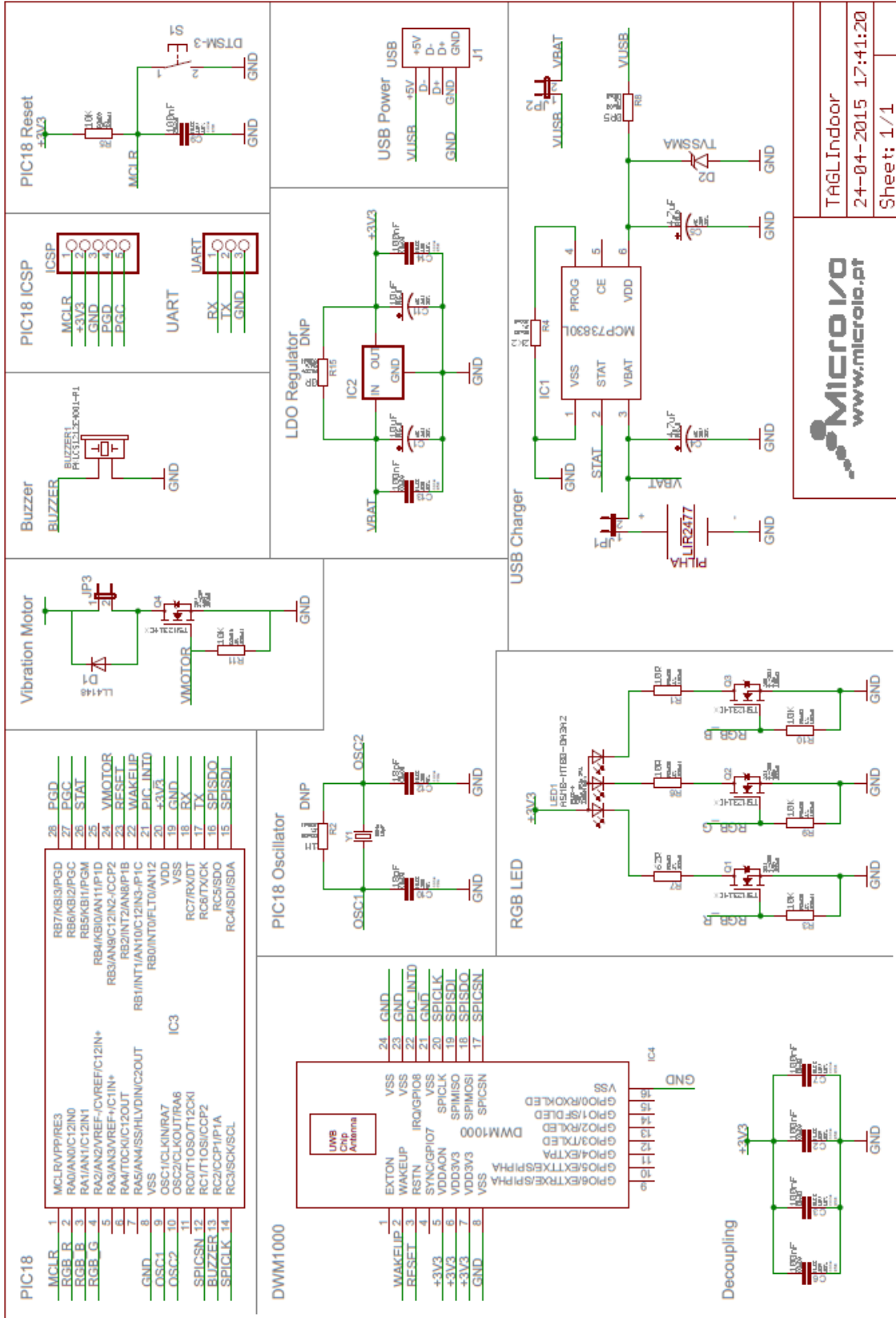
A Decawave propôs recentemente (Novembro de 2015) um esquema de comunicação otimizado em relação ao TWRS realizado neste projeto. No respetivo esquema de comunicação, o nó móvel envia uma mensagem inicial de sinalização para todos os nós fixos. De seguida estes respondem em diferentes janelas de tempo (sequenciais por identificador). O nó móvel recebe assim um número de mensagens igual ao número de nós fixos usados para a localização. Por fim, o nó móvel envia uma mensagem final recebida pelos nós fixos. Assim, sendo utilizados 4 nós fixos, seriam trocadas 6 mensagens, metade daquelas que se verificaram no ensaio do sistema do presente projeto. Desta forma consegue-se reduzir o consumo de energia praticamente para metade, além de se reduzir o tempo de comunicação, aumentando o número de móveis que o sistema pode manter ativos em simultâneo.

No que diz respeito a aplicação, o desenvolvimento de uma interface mais completa, com a possibilidade de aceder ao histórico de localizações, possibilitaria uma melhoria significativa do sistema de localização pois abre portas para ser utilizado em serviços em que esse requisito é necessário (por exemplo deteção de movimentos indicam demência). O desenvolvimento de uma aplicação acessível, robusta e apelativa direcionada para os *smartphones*, é sem dúvida passo importante para a comercialização de um produto.

Anexos

- A. Esquemáticos
- B. Traçado das PCBs
- C. Protótipos

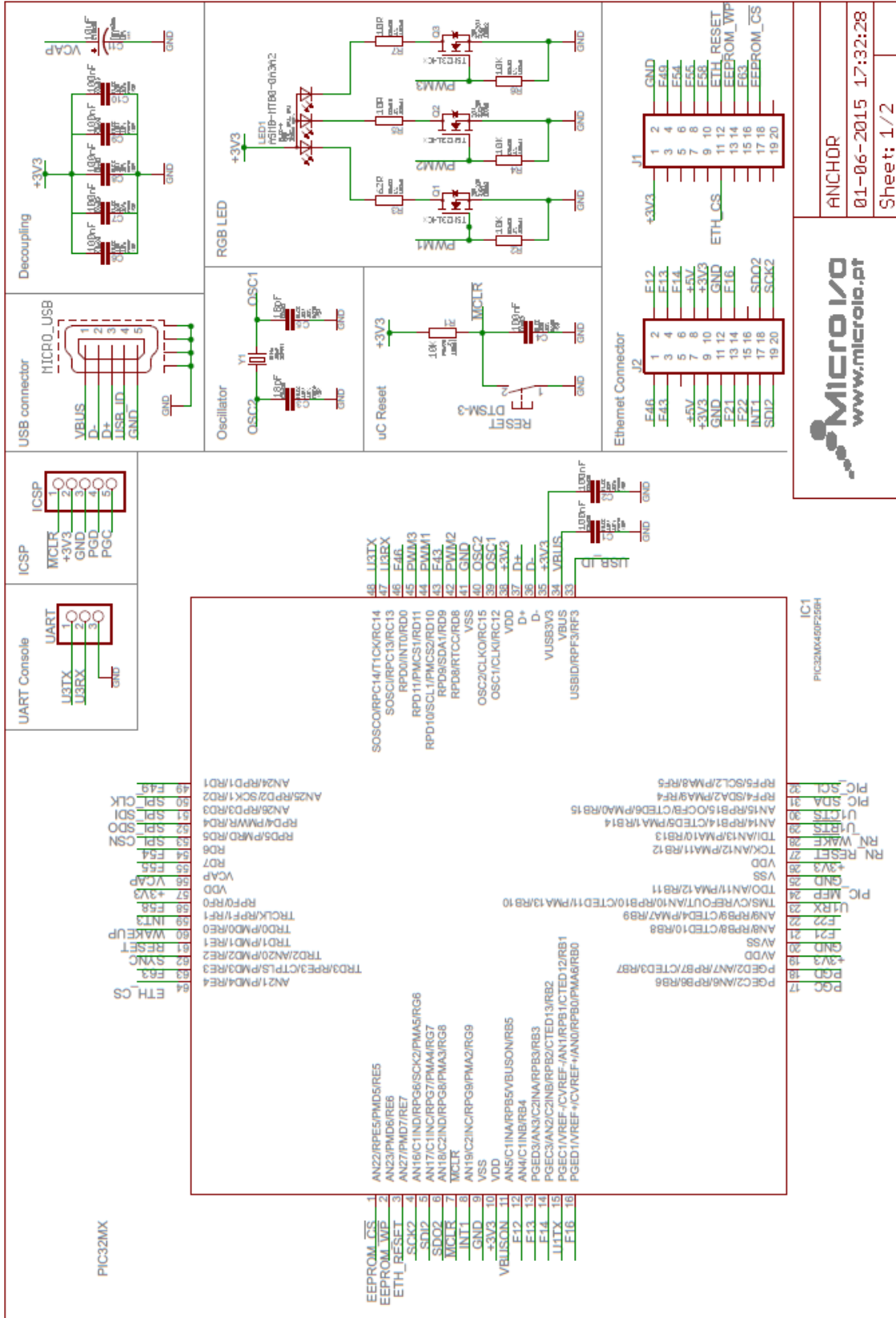
A1. Esquemático do Nó Móvel



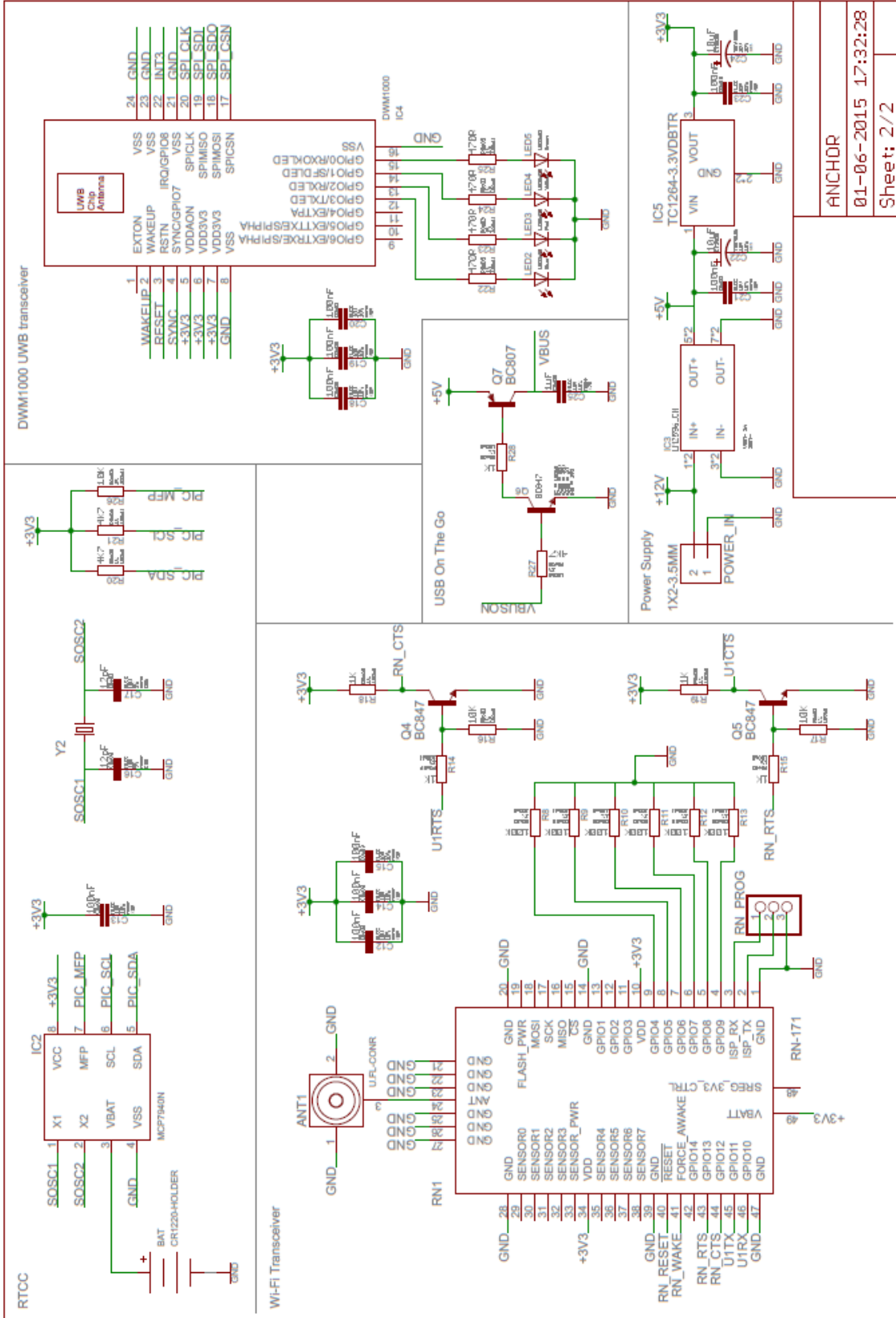
MICRO I/O
www.microio.pt

TAGL Indoor
24-04-2015 17:41:20
Sheet: 1/1

A2. Esquemático do Nó Fixo

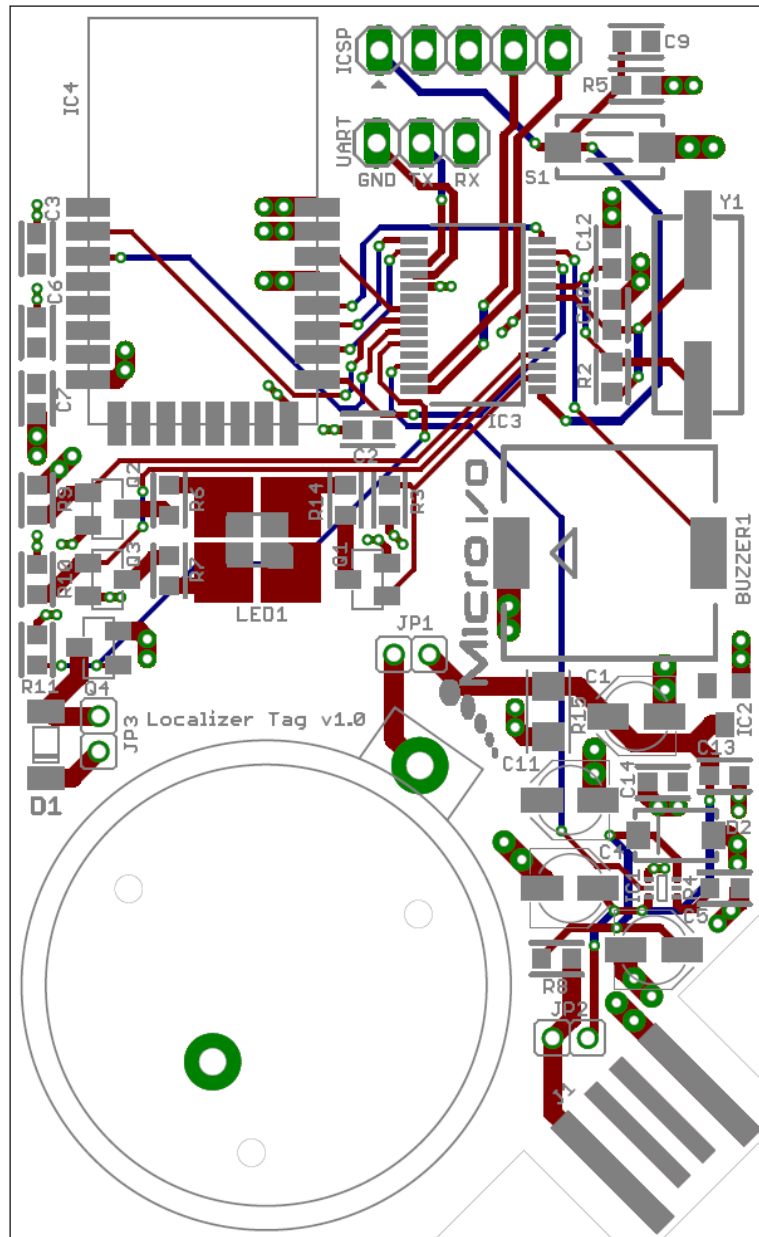


ANCHOR
01-06-2015 17:32:28
Sheet: 1/2

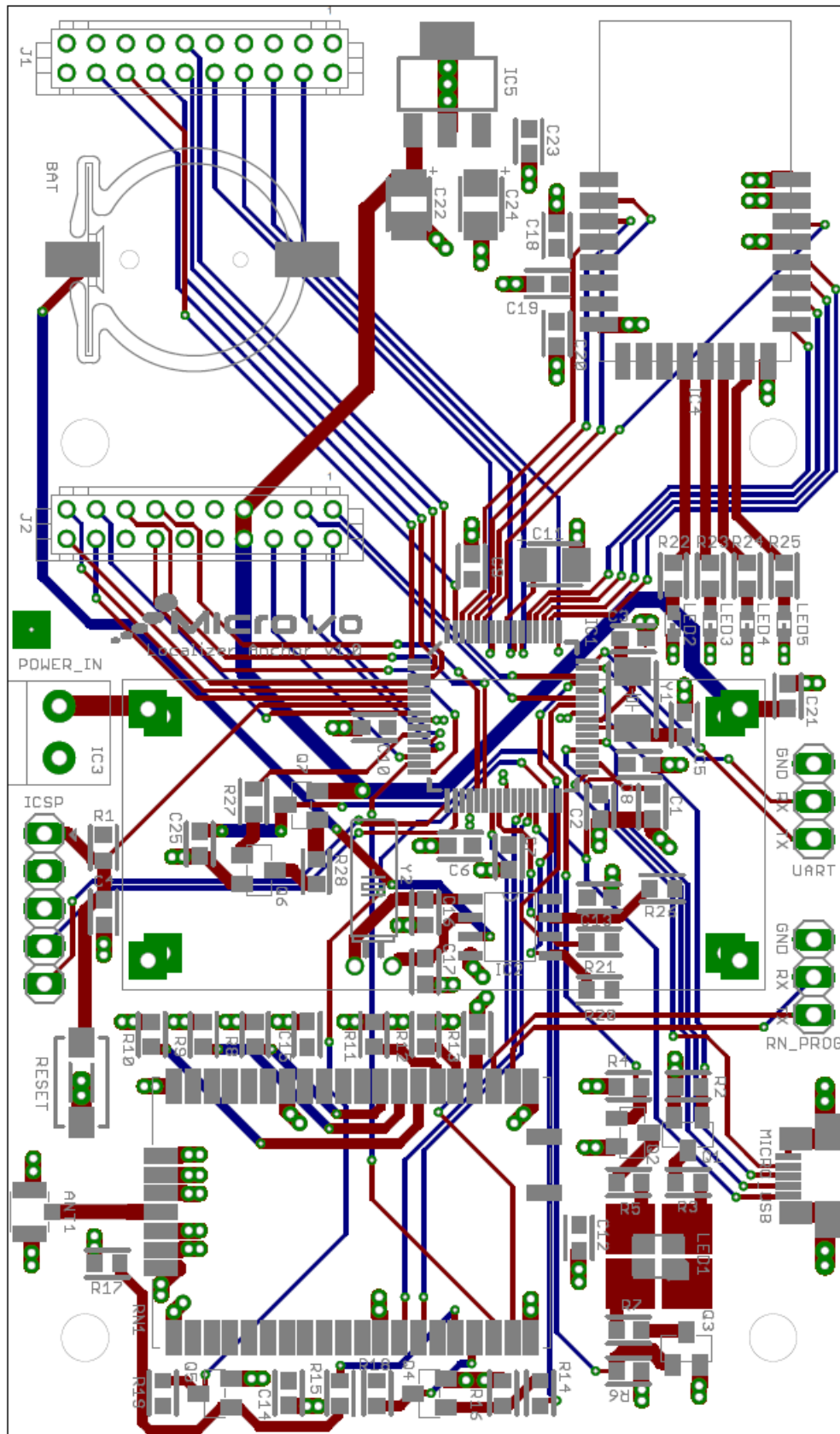


ANCHOR
01-06-2015 17:32:28
Sheet: 2 / 2

B1. Traçado da PCB do Nó Móvel



B2. Traçado da PCB do Nó Fixo



C1. Protótipo do Nó Móvel



C2. Protótipo do Nó Fixo



Bibliografia

- [1] Fábio Rodrigo Valadão Rico, Sistema de localização para a Universidade de Aveiro, Universidade de Aveiro, 2012.
- [2] J. F. G. Monico, Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS Descrição, fundamentos e aplicações. Unesp, 2000, pp. 19–21.
- [3] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and E. Wasle, GNSS Global Navigation Satellite Systems GPS, Glonass, Galileo & more. SpringerWienNewYork 2008, pp. 3–9, 309–319, 341–348, 365–372.
- [4] Dr. Rainer Mautz, Indoor Positioning Technologies, ETH Zürich, 2012.
- [5] A. Papastolou, Indoor localization and mobility management in the emerging heterogeneous wireless networks, Telecom & Management StudParis and Pierre & Marie Curie University (Paris VI), 2011.
- [6] Zahid Farid, Rosdiadee Nordin and Mahamod Ismail, Recent Advances in Wireless Indoor Localization Techniques and System, Hindawi Publishing Corporation, Journal of Computer Networks and Communications, 2013.
- [7] Hui Liu, Houshang Darabi, Pat Banerjee and Jin Liu, Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2007.
- [8] Guoqiang Mao and Baris Fidan, Localization Algorithms and Strategies for Wireless Sensor Networks, Information Science Reference, 2009, pp. 54–119.
- [9] Bob Violino, The Basics of RFID Technology, RFID Journal, 2005.
- [10] INTRODUCTION TO RFID, <http://www.veryfields.net/how-do-rfid-tags-work>, acedida em Março de 2015.
- [11] Erik Dahlgren, Hasan Mahmood, Evaluation of indoor positioning based on Bluetooth Smart technology, Chalmers University of Technology, 2014.
- [12] Why Zig Bee?, <http://www.centralite.com/index.php/technology>, acedida em Março de 2015.
- [13] Andrea Baschiroto, Kofi A. A. Makinwa, Frequency References Power Management for SoC, and Smart Wireless Interface, Springer, 2013, p. 297, 299.

- [14] DecaWave, <http://www.decawave.com/products/overview>, acedida em Março de 2015.
- [15] Redpoint Positioning, <http://www.redpointpositioning.com/products/>, acedida em Março de 2015.
- [16] OpenRTLS, <http://www.openrtls.com/page/rtls>, acedida em Março de 2015.
- [17] Eliko, <http://www.eliko.ee/eliko-is-in-the-top-10-semifinalists-of-ipsochallenge-2014/>, acedida em Março de 2015.
- [18] Sewio, <http://www.sewio.net/rtls-systems/>, acedida em Março de 2015.
- [19] Time Domain, <http://www.timedomain.com/p400.php>, acedida em Março de 2015.
- [20] Zebra Technologies, <https://www.zebra.com/us/en/solutions/research-and-learn/success-stories/aerospacemanufacturer.html#mainpartabscontainer=the-story>, acedida em Março de 2015.
- [21] Ubisense, http://mpg.ndlab.net/wp-content/uploads/2009/11/mocap_ubisense_hardware.pdf, acedida em Março de 2015.
- [22] Bespoon, <http://bespoon.com/>, acedida em Março de 2015.
- [23] Faranak Nekoogar, Ultra-Wideband Communications: Fundamentals and Applications: Fundamentals and Applications, Prentice Hall, 2005, capítulo 1.
- [24] I. C. Society, IEEE Standard do Local and metropolitan area networks-part 15.4: low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs), IEEE Computer Society, 2011.
- [25] E. Karapistoli, F.-N. Pavlidou, I. Gragopoulos, and I. Tsetsinas, An Overview of the IEEE 802.15.4a Standard, IEEE Communications Magazine, 2009.
- [26] DecaWave, APS015 Application Note: Two-way ranging security and the DW1000, DecaWave Ltd, 2015.
- [27] Comissão Europeia, L 293/48, Jornal Oficial da União Europeia, 2014.
- [28] DecaWave, <http://www.decawave.com/>, acedida em Março de 2015.
- [29] DecaWave, DWM1000 Data sheet-v1.01, DecaWave Ltd, 2014.
- [30] DecaWave, Product information: DWM100, DecaWave Ltd, 2014.

- [31] DecaWave, DW1000 user manual: How to use, configure and program the DW1000 UWB transceiver, DecaWave Ltd, 2014, p.197,198.
- [32] DecaWave, APS003 application note: An introduction to real time location systems, DecaWave Ltd, 2014.
- [33] DecaWave, APPS007 application note: Wired synchronization of anchor nodes in a TDOA real time location system, DecaWave Ltd, 2014.
- [34] DecaWave, APS015 Application Note: Two-way ranging security and the DW1000, DecaWave Ltd, 2015.
- [35] DecaWave, APS011 application note: Sources of error in dw100 based two-way ranging (twr) schemes, DecaWave Ltd, 2014.
- [36] DecaWave, APS013 application note: The implementation of two-way ranging with the dw1000, DecaWave Ltd, 2014.
- [37] DecaWave, An Introduction to DW1000 Healthcare Applications, 2014.
- [38] DecaWave, An Introduction to DW1000 Security and Safety Applications, DecaWave Ltd, 2014.
- [39] MULTICOMP, LIR2450 Data Sheet, 2011.
- [40] Microchip, <http://www.microchip.com/>, acedida em Abril de 2015.
- [41] Microchip, PIC18F23K20/24K20/25K20/26K20/43K20/44K20/45K20/46K20 Data Sheet, 2010.
- [42] Microchip, PIC32MX330/350/370/430/450/470 Data Sheet, 2007.
- [43] Microchip, 2.4 GHz IEEE Std. 802.11 b/g Wireless LAN Module Data Sheet, 2014.
- [44] Microchip, MCP7940N Data sheet, 2014.
- [45] Murata, Piezoelectric Sound Components, 2014, pp.18.
- [46] DecaWave, DW1000 Device Driver Application Programming Interface (API) Guide, DecaWave Ltd, 2015.
- [47] DecaWave, EVK1000 User Manual, DecaWave Ltd, 2015.
- [48] Microchip, WiFly Command Reference, Advanced Features and Applications User's Guide, 2014.

[49] Oguejiofor O.S, Aniedu A.N, Ejiofor H.C, Okolibe A.U, Trilateration Based localization Algorithm for Wireless Sensor Network, International Journal of Science and Modern Engineering, 2013.

[50] Robert Dixon, Mathgraphics, Dover Publications, 2010, pp.68.

[51] Matlab, <http://www.mathworks.com/products/matlab/>, acedida em Setembro de 2015.

[52] Wireshark, <https://www.wireshark.org/#learnWS/>, acedida em Agosto de 2015.