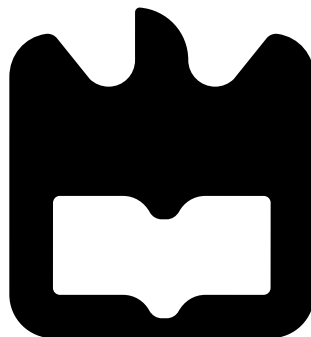




João Paulo de Barros
Albuquerque

Interrogadores SDR para RFID harmónicos





**João Paulo de Barros
Albuquerque**

Interrogadores SDR para RFID harmónicos

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 Doutor Nuno Miguel Borges de Carvalho do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro.

o júri / the jury

presidente / president

Professor Doutor Paulo Miguel Nepomuceno Pereira Monteiro

Professor Associado do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro (por delegação da Reitoria da Universidade de Aveiro)

vogais / examiners committee

Professor Doutor Fernando José da Silva Velez

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade da Beira Interior (arguente principal)

Professor Doutor Nuno Miguel Gonçalves Borges de Carvalho

Professor Catedrático do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro (orientador)

**agradecimentos /
acknowledgements**

Agradeço ao orientador desta dissertação, Professor Nuno Borges de Carvalho, pela oportunidade dada, orientação e partilha de conhecimento, assim como ao Tagleorge Silveira, pela ajuda e disponibilidade prestada durante este trabalho.

A todos os professores e técnicos que, com os seus ensinamentos e conselhos, marcaram e ajudaram a minha formação até agora.

Aos meus amigos e colegas deste percurso académico, em particular o Filipe Renca e o Júlio Ferreira, por terem proporcionado dos melhores momentos de diversão e estarem presentes nos menos bons, e o João Lima, pelos conselhos dados nestes últimos anos.

Por fim, agradeço aos meus pais pelo apoio e amor incondicional dados ao longo da minha vida.

palavras-chave

Identificação por Radiofrequência, RFID Harmônicos, Rádio Definido por Software, Antena Guia de Ondas Coplanar

resumo

Actualmente, a tecnologia de Identificação por Radiofrequência (RFID) é usada em diversos cenários e está em constante evolução, o que implica ter de usar diferentes protocolos de comunicação para continuar a ser obtido o melhor desempenho possível. A tecnologia de Rádio Definido por Software (SDR) é flexível, permite operar com diversos standards, é de fácil actualização e permite ajustes em parâmetros que são úteis para aplicações RFID. A tecnologia RFID harmónicos (hRFID) surge como alternativa a sistemas RFID ao limitar e cancelar problemas usuais como auto-bloqueio e interferências multi-percurso.

Esta dissertação propõe o estudo e desenvolvimento de uma solução de um sistema de transmissão e recepção baseado em SDR, com antenas que operem na gama de frequências de 900 MHz (UHF) e 1.8 GHz (GSM), e usando formatos de modulação BPSK e QPSK, de forma a avaliar a utilização de tais dispositivos em soluções hRFID.

Os resultados obtidos comprovam que a solução avaliada é aplicável em soluções de sistemas baseados em hRFID.

keywords

Radio-Frequency Identification, Harmonic RFID, Software Defined Radio, Coplanar Waveguide Antenna

abstract

Currently, Radio-Frequency Identification (RFID) technology is used in different scenarios and is constantly evolving, which means using different communication standards to continue to obtain the best possible performance. Software Defined Radio (SDR) technology is flexible, allows it to operate with different standards, is easy to update, and allows for parameter adjustments that are useful for RFID applications. Harmonic RFID technology (hRFID) appears as an alternative to RFID systems by limiting and canceling common problems such as self-jamming and multi-path interference.

The main focal point of this dissertation is the study and development of a solution for a transmission and reception system based on SDR, with antennas operating in the 900 MHz (UHF) and 1.8 GHz (GSM) frequency range, and using BPSK and QPSK modulation formats, to evaluate the use of such devices in hRFID solutions.

The obtained results show the solution evaluated applies to system solutions based on hRFID.

Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de Acrónimos	vii
1 Introdução	1
1.1 Motivação e Contexto	1
1.2 Objectivos	2
1.3 Organização da Dissertação	3
2 Identificação por Radiofrequência	4
2.1 Introdução e Funcionamento	4
2.2 RFID Harmónicos	6
2.3 Outras aplicações com uso de RFID	7
3 Rádio Definido por Software	16
3.1 Introdução e Funcionamento	16
3.2 Dispositivos e Softwares	18
4 Antena	23
4.1 Introdução e Funcionamento	23
4.2 Antena Guia de Ondas Coplanar	25
4.2.1 Design e Medições	25
5 Configurações, Medições e Resultados	30
5.1 Configurações	30
5.2 Medições	34
5.2.1 Transmissão e Recepção a 900 MHz	34
5.2.2 Transmissão e Recepção a 1.8 GHz	36
5.2.3 Modulação BPSK a 900 MHz	37
5.2.4 Modulação BPSK a 1.8 GHz	38
5.2.5 Modulação QPSK a 900 MHz	40
5.2.6 Modulação QPSK a 1.8 GHz	41
5.3 Resultados	43
5.3.1 Transmissão e Recepção a 900 MHz	43
5.3.2 Transmissão e Recepção a 1.8 GHz	44

5.3.3	Modulação BPSK a 900 MHz	45
5.3.4	Modulação BPSK a 1.8 GHz	47
5.3.5	Modulação QPSK a 900 MHz	48
5.3.6	Modulação QPSK a 1.8 GHz	50
5.4	Análise de Resultados	51
6	Conclusão e Trabalho Futuro	54
6.1	Conclusão	54
6.2	Trabalho Futuro	56
	Bibliografia	57

Lista de Figuras

1.1	Diagrama de blocos de um sistema RFID [4].	1
1.2	O crescimento estimado do mercado global de sistemas RFID, entre 2000 e 2005, em milhões de US\$, e com a classificação por aplicação [2].	2
2.1	Sistema de leitura de um RFID chipless. O reader interroga a tag com um sinal UWB, e depois o sinal retroespalhado (backscattered) vindo da tag é analisado para se obter a identificação. TX - Transmissor; RX - Receptor [12].	5
2.2	Sistema hRFID de 1-bit [14].	7
2.3	Sistema de comunicação de um hRFID [8].	7
2.4	Sistema ATIS [16].	8
2.5	Aquisição das condições de teste [17].	9
2.6	Configuração do equipamento RFID de teste [17].	10
2.7	Especificações do sistema de comunicação oportunista com uso de BLE [22].	11
2.8	Configurações dos testes com um carro (2.8a) e numa linha ferroviária (2.8b) [22].	12
2.9	Representação do sistema de controlo de um portão UHF-RFID com um reader de antena única e um conjunto (grid) de tags (2.9a) e configuração de medição do sistema proposto (2.9b) [1].	13
2.10	Layout do sensor RFID com bateria usando para a medição da temperatura corporal [25].	13
2.11	Posicionamento dos RFID na pele ou no equipamento dos bombeiros [25].	14
3.1	Diagrama de blocos de um transmissor SDR, baseado em [36].	17
3.2	Diagrama de blocos de um receptor SDR, baseado em [36].	18
3.3	Dispositivos SDR.	18
3.4	Diagrama de blocos do ADALM-Pluto e o seu interior [46].	20
3.5	Diagrama de blocos de um sistema SDR (ADALM-Pluto).	20
4.1	Diagrama básico de um sistema de comunicação por ondas electromagnéticas, em meio livre. A antena é uma interface de transição entre o meio livre e um sistema de guiagem de ondas.	23
4.2	Antena Microstrip (Patch) em forma rectangular [53].	24
4.3	Antena projectada e produzida.	25
4.4	Diagramas de radiação da antena a 900 MHz (4.4a) e a 1.8 GHz (4.4b).	26
4.5	Medição das características da antena efectuadas dentro de uma câmara anecóica (4.5a) e parâmetros S obtidos com recurso a um VNA (4.5b).	28
4.6	Comparação entre os parâmetros S11 simulados e medidos.	28

5.1	Diagrama de blocos simplificado da configuração utilizada, para transmissão-recepção entre SDRs.	30
5.2	Diagrama de blocos da configuração usada para as medições efectuadas a 900 MHz.	31
5.3	Diagrama de blocos da configuração usada para as medições efectuadas a 1.8 GHz.	31
5.4	SDR ADALM-PLUTO acoplado a uma das antenas desenvolvidas.	32
5.5	Variação da distância entre as antenas.	33
5.6	Sistema de transmissão do ADALM-Pluto a 900 MHz, com blocos do Simulink e respectivos parâmetros.	35
5.7	Sistema de transmissão do ADALM-Pluto a 1.8 GHz, com blocos do Simulink e os parâmetros do bloco da constante.	36
5.8	Sistema de transmissão e recepção do ADALM-Pluto a 900 MHz em modulação BPSK, com blocos do Simulink e respectivos parâmetros.	38
5.9	Sistema de transmissão e recepção do ADALM-PLUTO a 1.8 GHz em modulação BPSK, com blocos do Simulink e respectivos parâmetros.	39
5.10	Sistema de transmissão e recepção do ADALM-Pluto a 900 MHz em modulação QPSK, com blocos do Simulink e respectivos parâmetros.	41
5.11	Sistema de transmissão e recepção do ADALM-Pluto a 1.8 GHz em modulação QPSK, com blocos do Simulink e respectivos parâmetros.	42
5.12	Recepção a 900 MHz, com variação da distância entre as antenas.	44
5.13	Recepção a 1.8 GHz, com variação da distância entre as antenas.	45
5.14	Diagramas de constelação depois da passagem pelo sincronizador da portadora, a 900 MHz e em modulação BPSK, com variação da distância entre as antenas.	46
5.15	Diagramas de constelação depois da passagem pelo sincronizador da portadora, a 1.8GHz e em modulação BPSK, com variação da distância entre as antenas.	48
5.16	Diagramas de constelação depois da passagem pelo sincronizador da portadora, a 900 MHz e em modulação QPSK, com variação da distância entre as antenas.	49
5.17	Diagramas de constelação depois da passagem pelo sincronizador da portadora, a 1.8 GHz e em modulação QPSK, com variação da distância entre as antenas.	51

Lista de Tabelas

3.1	Características dos dispositivos SDR referenciados [41][42][43][44].	19
3.2	Especificações principais do ADALM-PLUTO [41].	21
4.1	Cálculos das distâncias near field, far field e do comprimento de onda da antena, a 900 MHz e a 1.8 GHz.	27
5.1	Valores de pico, ruído e SNR obtidos experimentalmente, para a recepção da frequência de operação de 900 MHz, e comparação destes valores para diferentes distâncias entre as antenas.	51
5.2	Valores de pico, ruído e SNR obtidos experimentalmente, para a recepção da frequência de operação de 1.8 GHz, e comparação destes valores para diferentes distâncias entre as antenas.	52
5.3	Valores de EVM obtidos experimentalmente, para os formatos de modulação BPSK e QPSK, com frequência de operação de 900 MHz e 1.8 GHz, e comparação dos mesmos para diferentes distâncias entre as antenas.	52

Lista de Acrónimos

ADC	Analog-to-Digital Converter
AEI	AQIS Entity Identifier
ATIS	Automatic Train Identification System
BLE	Bluetooth Low Energy
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
CBM	Condition-Based Maintenance
CPW	Coplanar Waveguide
DAC	Digital-to-Analog Converter
dBFS	Decibels Relative to Full Scale
DSP	Digital Signal Processor
EU	European Union
EVM	Error Vector Magnitude
GAP	Bluetooth Generic Access Profile
GSM	Global System for Mobile Communications
HF	High Frequency
hRFID	Harmonic Radio-Frequency Identification
IC	Integrated Circuit
ID	Identifier
IFF	Identification Friend or Foe
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
LF	Low Frequency
LNA	Low-Noise Amplifier
LO	Local Oscillator
MATLAB	Matrix Laboratory
NHU	Number of Hidden Units

OTG	On-The-Go
PA	Power Amplifier
PC	Personal Computer
ppm	Parts per Million
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RADAR	Radio Detection and Ranging
RCS	Radar Cross-Section
RF	Radio-Frequency
RFID	Radio-Frequency Identification
RL	Return Loss
RMS	Root Mean Square
RNN	Recurrent Neural Network
SDR	Software Defined Radio
SMA	SubMiniature Version A
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TBM	Time-Based Maintenance
TDR	Time Domain Reflectometry
UHF	Ultra High Frequency
US	United States
USB	Universal Serial Bus
USR	Universal Software Radio Peripheral
UWB	Ultra Wide Band
VNA	Vector Network Analyzer

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação e Contexto

Ao longo dos últimos anos, os sistemas de Identificação por Radiofrequência ou Radio-Frequency Identification (RFID) têm tido um interesse e utilização crescente, e esta tecnologia é usada não só em contexto de controlo de acesso, gestão de armazéns e logística, com também em outras aplicações [1].

O RFID é uma técnica de identificação automática de objectos, através da transferência de dados sem fios por meio de ondas de radiofrequência ou Radio-Frequency (RF) [2] [3]. Um sistema RFID é constituído por três componentes, um leitor ou reader, uma etiqueta ou tag e por um controlador de software ou middleware software. A Figura 1.1 representa um diagrama de blocos de um sistema RFID.

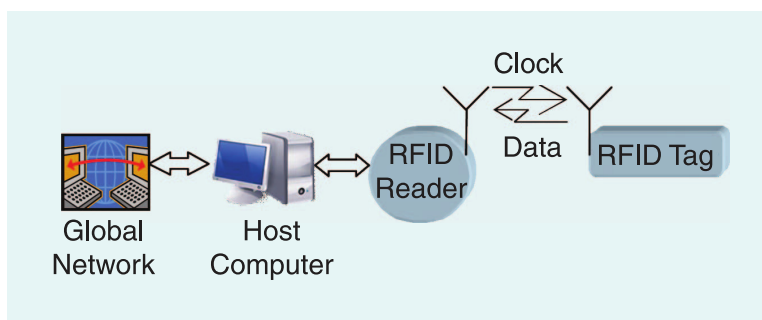


Figura 1.1: Diagrama de blocos de um sistema RFID [4].

O reader transmite o sinal de interrogação RF, que é recebido pela tag. O sinal alimenta o chip, que então retransmite o sinal modulado de volta para o receptor, com a informação de identificação. O reader envia os sinais de interrogação para a tag, de forma que esta seja identificada [4]. No entanto, a tag só pode ser identificada desde que se encontre no raio de alcance do reader. A tag é onde se encontra o código de identificação ou ID code, e o middleware software contém a interface e o protocolo de software para codificar e decodificar os dados de identificação do reader para um PC ou mainframe, combinando desta forma o sistema de radio-frequência com o sistema computacional. Um sistema RFID pode operar desde frequências de micro-onda até altas-frequências [5].

O uso e desenvolvimento de RFIDs levaram a um número crescente de aplicações baseadas nesta tecnologia. Em 2018, mais de 15 mil milhões de tags RFID foram vendidas, o que representou um aumento de 23% face a 2017 [6]. Segundo um estudo, [7], em 2019 o valor total do mercado dos RFID terá um valor total de 11.6 mil milhões de US\$, e que em 2022 poderá atingir um valor de 13 mil milhões de US\$.

A Figura 1.2 apresenta uma perspectiva do aumento global do mercado de sistemas RFID num relativo curto intervalo de tempo, e as suas aplicações.

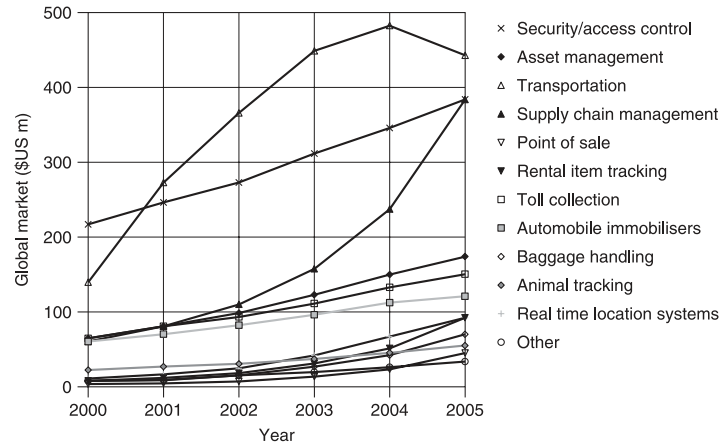


Figura 1.2: O crescimento estimado do mercado global de sistemas RFID, entre 2000 e 2005, em milhões de US\$, e com a classificação por aplicação [2].

Embora o sistema RFID actual já esteja bem estabelecido, existem algumas desvantagens, como o auto-bloqueio (self-jamming) e a interferência multi-percurso (multi-path), o que limita o potencial deste tipo de sistema [8]. O auto-bloqueio é normalmente gerado pela falta de isolamento entre os percursos de transmissão e de recepção das tags, enquanto que a interferência multi-percurso é geralmente causada por reflexões em estruturas ao redor e por interferência de outras tags que operem na mesma banda de frequência. Nos últimos anos, algumas técnicas foram propostas para cancelar o auto-bloqueio e limitar a interferência multi-path, e é neste contexto que, mais recentemente, foram propostas soluções de interrogadores de RFID Harmónicos ou Harmonic Radio-Frequency Identification (hRFID) e soluções baseadas em Rádio Definido por Software ou Software Defined Radio (SDR) como alternativa para sistemas RFID convencionais de frequência única [8].

1.2 Objectivos

Os objectivos desta dissertação são:

- Desenvolvimento de uma solução baseada em SDR para avaliar a utilização de tais dispositivos em soluções RFID;
- Desenvolvimento de soluções de leitura para RFID harmónicos (hRFID);
- Desenvolvimento de uma antena que opere a duas frequências, a 900 MHz (UHF) e a 1.8 GHz (GSM).

1.3 Organização da Dissertação

Além deste capítulo de introdução, esta dissertação encontra-se dividida nos seguintes capítulos:

- **Capítulo 2** - Identificação por Radiofrequência : É dada uma explicação sobre a tecnologia RFID e é feito um levantamento de algumas aplicações;
- **Capítulo 3** - Rádio Definido por Software : É feita uma análise da tecnologia SDR, do seu funcionamento geral e são apresentados dispositivos e softwares existentes;
- **Capítulo 4** - Antena : É dada uma explicação breve do conceito de uma antena e demonstrada a antena desenvolvida para a parte experimental desta dissertação;
- **Capítulo 5** - Configurações, Medições e Resultados : São apresentadas as configurações e a implementação do sistema, e são obtidos e analisados os resultados;
- **Capítulo 6** - Conclusão e Trabalho Futuro: É feita uma análise sobre o trabalho realizado, tiradas conclusões sobre o que foi executado e o que poderá vir a ser feito no futuro.

Capítulo 2

Identificação por Radiofrequência

Neste capítulo é apresentado o conceito da tecnologia RFID, começando com uma breve introdução histórica, as classificações dos sistemas RFID, o surgimento da tecnologia hRFID e as aplicações para estes sistemas.

2.1 Introdução e Funcionamento

A origem do sistema RFID remota quase aos inícios da rádio, porém só começou a ganhar notoriedade quando a tecnologia da rádio passou a ser usada para identificar objectos, durante a Segunda Guerra Mundial. As primeiras experiências com rádio para identificação de objectos foram conduzidas por Sir Robert Watson-Watt e sua equipa, quando desenvolveram a Detecção e Telemetria por Rádio ou Radio Detection and Ranging (RADAR), em 1937 [9] [10].

O sistema usava um transmissor-receptor (transponder) que transmitia um sinal de alta potência, e o avião reflectia passivamente uma pequena quantidade de energia de rádio de volta, que era recebida pelo receptor no sistema de rádio. O radar servia apenas para identificar a presença de um objecto, porém não dava detalhes sobre este, para além do seu tamanho. Como era importante saber se era um aliado ou um inimigo, Watson-Watt desenvolveu um sistema conhecido como Identification Friend or Foe (IFF). Um transponder era colocado em cada avião e, quando interrogado por uma estação terrestre, enviava um código para identificá-lo como sendo um avião aliado. Embora as técnicas que são usadas hoje já tenham sido desenvolvidas de forma significativa desde aquela época e tenham aplicações diferentes, os mesmos princípios ainda se aplicam [10].

A maioria das tags e transponders RFID são compostas por uma antena e por um circuito integrado (IC). As tags dos sistemas RFID podem ser classificadas pelo seu método de energização, em tags passivas, activas ou semi-passivas. As tags passivas são as que não possuem um transmissor de rádio nem um fornecedor de energia (bateria), ou seja, dependem da energia vinda do sinal de interrogação proveniente do reader. Por outro lado, as tags activas possuem um transmissor de rádio e uma bateria integrada, transmitindo desta forma a informação que tenham armazenadas sem necessitar de recorrer à energia emitida pelo reader. As tags semi-passivas já possuem um fornecedor de energia para a alimentação do seu IC, porém funcionam do mesmo modo que as passivas, isto é, dependem do reader para realizar uma comunicação [3] [11]. Uma tag passiva tem a vantagem de ter um baixo custo associado, porém tem um baixo alcance de leitura (por norma tem aproximadamente 3 m de alcance). Já uma tag activa tem a desvantagem de ser mais cara, mas tem, em geral, um alcance na

gama das dezenas de metros. O custo de um sistema RFID está associado ao custo da tag, que por si depende do custo do IC, daí cada vez mais se investir em tags chipless [4].

Uma tecnologia com a qual os RFID se podem comparar são os códigos de barras. Estes são usados desde os anos 70, com a sua grande vantagem ser o facto de ter um custo de fabrico bastante barato. Contudo, só podem ser lidos a uma distância muito curta e a sua localização não pode ser automatizada, ao passo que uma tag RFID tem um ID code único para cada objecto e podem ser lidos a uma distância superior [12]. Porém, a principal desvantagem das tags são o seu custo, o que pode ser um factor limitativo para certas aplicações. Uma tag RFID custa em norma entre 10 cêntimos a 1€, o que é consideravelmente mais caro do que um código de barras, que custa entre 0.5 a 2 cêntimos. A produção de uma label é de uma fracção de cêntimo uma vez que pode ser feito com um substracto de papel com impressão directa do código de barras [12].

Uma solução que fica a meio-termo entre um RFID convencional e o código de barras são os RFID chipless. Como o nome indica, a tag não possui um chip, e o circuito é impresso directamente no substracto [12]. Esta característica permite que a tag seja, potencialmente, tão barata como um código de barras, mas com a vantagem de ter um maior alcance de leitura e a capacidade de ser lida sem ter uma limitação de linha de visão. O RFID chipless é uma técnica de identificação na qual a tag não tem nenhum componente electrónico agarrado (attached) à superfície, sendo apenas as propriedades electromagnéticas e de retroespalhamento (backscattered) da tag que são usadas para a identificação (Figura 2.1) [12].

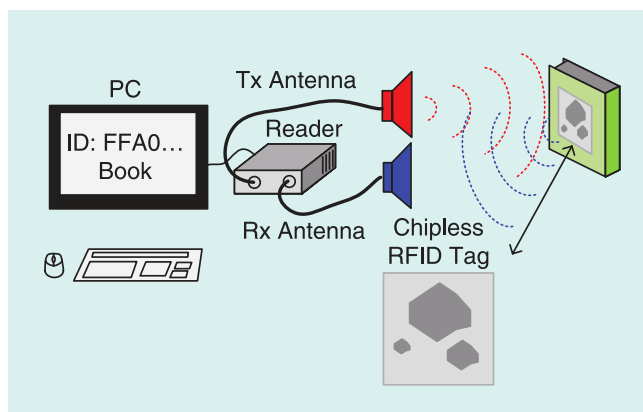


Figura 2.1: Sistema de leitura de um RFID chipless. O reader interroga a tag com um sinal UWB, e depois o sinal retroespalhado (backscattered) vindo da tag é analisado para se obter a identificação. TX - Transmissor; RX - Receptor [12].

Contudo, o principal problema de se desenvolver uma tag RFID chipless é como ter a codificação de dados sem a presença de um chip. Para tal, existem três categorias de tags chipless diferentes [4]:

- Tags chipless baseadas em reflectómetro de domínio temporal (TDR);
- Tags chipless baseadas em assinatura espectral (Spectral signature);
- Tags chipless baseadas em retroespalhamento de amplitude ou fase (Amplitude/ phase backscatter modulation).

As tags chipless baseadas em reflectrómetro de domínio temporal ou Time Domain Reflectometry (TDR) são interrogadas ao enviar um sinal do reader sob a forma de um pulso, e ouvindo os ecos do pulso enviados pela tag, isto é, uma cadeia de pulsos é criada, a qual pode ser usada para codificar dados. Estas tag chipless podem ser imprimíveis ou não-imprimíveis. As vantagens em relação às com chip são o baixo custo, intervalos de leituras mais elevados e a sua utilidade quando usadas em aplicações de localização ou posicionamento. Já as desvantagens são o número de bits que podem ser codificados e o facto de, para gerar e detectar pulsos UWB, ser necessário um reader RFID front-end de alta velocidade [4].

As tags chipless baseadas em assinatura espectral codificam dados no espectro ao fazer uso de estruturas ressonantes. Cada bit de dados é associado à presença ou ausência de um pico ressonante a uma frequência predeterminedada. As tag chipless spectral-signature distinguem-se entre químicas ou de circuito planar. As vantagens são que são imprimíveis, são robustas, possuem uma maior capacidade de armazenamento de dados quando comparadas com as de outros tipos e são de baixo custo. Porém, têm grandes requisitos para a codificação de dados e para a orientação de tags chipless, que são o seu tamanho e o facto de requerer componentes RF dedicados de banda larga para o reader RFID [4].

As tags chipless baseadas em retroespalhamento de amplitude ou fase realizam a codificação de dados pela variação de amplitude ou de fase do sinal retroespelhado (backscattered) com base no carregamento da antena da tag chipless [4]. A variação da carga é controlada pelo carregamento reactivo da antena, ao invés de ser por um interruptor on/ off entre duas impedâncias. Este carregamento da antena influencia o Radar Cross-Section (RCS) da antena em amplitude ou fase, o que pode ser detectado por um RFID reader dedicado. As vantagens são que opera numa largura de banda estreita, o que implica que requer menos largura de banda para operações do que as outras soluções, para além de que tem uma arquitectura simples. Contudo, o número de bits que podem ser detectados é menor que os outros tipos e a codificação de dados é realizada por um componente agrupado, o que faz aumentar o seu custo [4]. Todos os três tipos de tags podem ser imprimíveis ou não, o que determina a sua validade para certas aplicações, a sua robustez e o seu custo. Dependente da aplicação, há inúmeras tecnologias RFID diferentes e vários tipos de tags.

As gamas de frequência mais comuns em sistemas RFID são 125-134 kHz, 13.56 MHz, 860-960 MHz e 2.4-2.45 GHz. Estes sistemas podem ser classificados também pela sua gama de operação, da seguinte forma [11]:

- Sistemas Low Frequency (LF) - 125-134 kHz;
- Sistemas High Frequency (HF) - 13.56 MHz;
- Sistemas Ultra High Frequency (UHF) - 860-960 MHz (EU) / 2.4-2.45 GHz (US).

Protocolos de anti-colisão são usados para implementações mais robustas [13].

2.2 RFID Harmónicos

As tags RFID podem gerar e transmitir harmónicos, caso se tenha em consideração o design específico da antena tag, a sensibilidade IC ou a potência de RF mínima necessária do sinal de consulta do interrogador para activar o chip da tag, e a potência e a largura de banda do sinal de interrogação [8].

O conceito de um sistema hRFID é ilustrado na Figura 2.2 e na Figura 2.3. No primeiro caso a tag harmónica recebe a frequência fundamental (f_0) e emite a frequência harmónica ($2 \cdot f_0$) [14], enquanto que no outro cenário o interrogador transmite para a tag na frequência fundamental (f_0), e os elementos não lineares na tag geram harmónicos de ordem superior ($n \cdot f_0$) e emitem de volta para o interrogador [8].

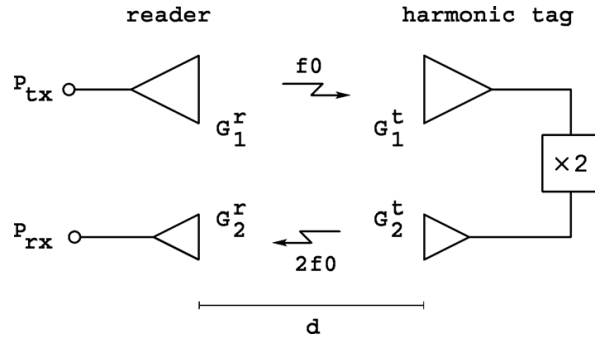


Figura 2.2: Sistema hRFID de 1-bit [14]

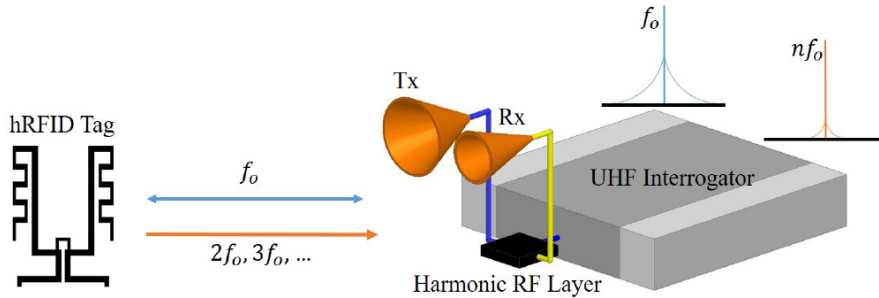


Figura 2.3: Sistema de comunicação de um hRFID [8].

2.3 Outras aplicações com uso de RFID

Uma das soluções que a tecnologia Radio-Frequency Identification apresenta é a identificação e rastreamento de vários objectos fixos e móveis. Em [5], com uso específico em veículos ferroviários, o sistema RFID discutido é um sistema de identificação automática de objectos, que utiliza micro-ondas para reconhecimento de objectos distantes. A antena de transmissão-recepção projectada é um conjunto de antenas array microstrip, que têm características vantajosas como serem de pequeno volume, peso leve, o baixo perfil e de serem de fácil fabrico. As antenas microstrip são abordadas mais detalhadamente no Capítulo 4. A antena de transmissão/ recepção do sistema RFID opera a 915 MHz, o que faz poupar alguns recursos de frequência. Os resultados medidos neste artigo mostram que o sistema RFID tem um desempenho bastante satisfatório, e as suas especificações satisfazem os requisitos de identificação de veículos ferroviários [5].

As tags RFID também permitem tornar os contentores em autênticos portadores de fluxo de informação, assim como permite integrar o fluxo e distribuição física e obter o rastreamento em tempo real de contentores [15]. Neste artigo é apresentada uma tecnologia RFID para recolha

de informações sobre o estado do contentor no expedidor, na estação e na zona de supervisão alfandegária, e usa o sistema Automatic Train Identification System (ATIS) (Figura 2.4) para recolher informações sobre o comboio que chega ou que parte, como por exemplo o número do comboio, o número da carruagem, registar a estação, a hora, o número AQIS Entity Identifier (AEI), etc. . A estação local (database) conecta-se com a database do sistema ATIS e, quando o sistema ATIS rastreia as informações do comboio, a database local é capaz de obter as informações do estado do contentor em tempo real. Este trabalho integrou os dados obtidos por equipamentos RFID e pelo sistema de informação ATIS, e realizou a gestão de visualização do contentor ao longo de todo o transporte, fornecendo desta forma aos clientes as informações detalhadas do estado do contentor [15].

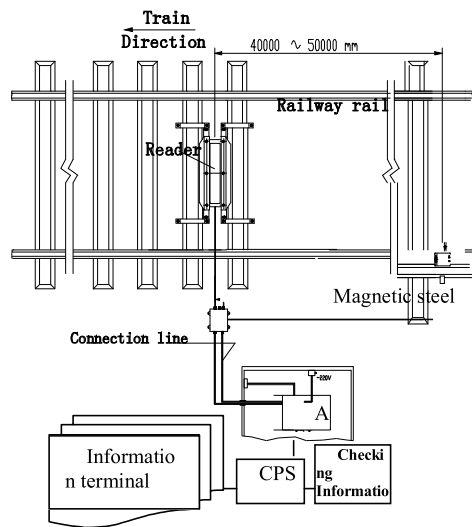


Figura 2.4: Sistema ATIS [16].

Apesar do desempenho muito bem-sucedido do sistema ATIS baseado em RFID para comboios convencionais com velocidades de até 150 km/h, outros desafios precisam de ser resolvidos para a utilização dessa tecnologia em sistemas ferroviários de alta velocidade, com valores de até 500 km/h. Em [16], são identificados e analisados esses possíveis problemas, e propõem algumas soluções para os problemas e desafios na utilização de tags RFID em ambientes de alta-velocidade.

Um dos problemas é que o sistema ATIS pode ser corrompido por RF, uma vez que, como o sistema ATIS faz uso do espectro electromagnético, é fácil ser bloqueado na presença de outros interferentes “high-energy” na mesma banda de frequência. Se os readers RFID de duas ou mais soluções diferentes estiverem a operar no mesmo espectro electromagnético e forem configurados no mesmo ambiente, a taxa de identificação diminui drasticamente [16]. Um outro fenómeno comum é que o ATIS falha a identificação de tags anexadas aos veículos, especialmente quando passam vários comboios pelos readers a alta-velocidade. Este problema é causado principalmente por colisões iniciadas pelos readers ou pelas tags, shifts de frequência de operação ou tempo de leitura insuficiente [16].

Um problema adicional é que qualquer pessoa com um reader de tags RFID pode as ler, já que a tecnologia RFID utilizada elimina a necessidade de serem varridas ou directamente lidas como é comum em fitas magnéticas ou códigos de barras. Para resolver esse problema deve-se aplicar um algoritmo de segurança, mais bits de informação serão necessários para a troca

entre um reader e a tag. Dado que a taxa de transmissão de bits da tag é fixa, demorará mais para completar a comunicação [16]. Outra questão é, como a velocidade ultrapassava os 300 km/h, um dos desafios diz respeito ao tempo limitado que uma tag permanece na faixa de alcance do reader, incorrendo de problemas adicionais. Existem dois factores fundamentais que determinam o desempenho de RFID para a aplicação em alta-velocidade, como o intervalo de tempo de leitura ou o tempo de identificação [17], assim como a velocidade com que a tag responde (em números de respostas por segundo). Existe também vários parâmetros que afectam esses valores, como por exemplo a distância entre a tag e a antena do reader, a existência de ruído de fundo no local e a própria orientação da tag [16].

As soluções para comprovar a detecção de tags em ambientes de alta-velocidade são conforme seja usada uma única tag dentro do alcance de um único reader RFID ou sejam usadas múltiplas tags ou múltiplos readers. No primeiro caso a solução passa pela utilização de tags semi-passivas [18] ou pela utilização de conjuntos de chips de resposta rápida (fast responding). No segundo caso a solução passa por ter um algoritmo de colisão (determinístico ou probabilístico), antenas direccionais ou desenvolver um design de hardware RFID mais potente e eficaz [16].

Num outro estudo, [17], foi aplicado um projecto para um sistema RFID de alta-velocidade, tendo em conta o design da antena a aplicar. A utilização de duas antenas (antenas array) resultou numa faixa de identificação mais ampla que o uso de uma única antena. O teste foi realizado num laboratório (Figura 2.5) e foi implementado um ambiente móvel para aplicação de altas-velocidades (na ordem dos 420 km/h) (Figura 2.6) e foi realizada a validação do sistema.

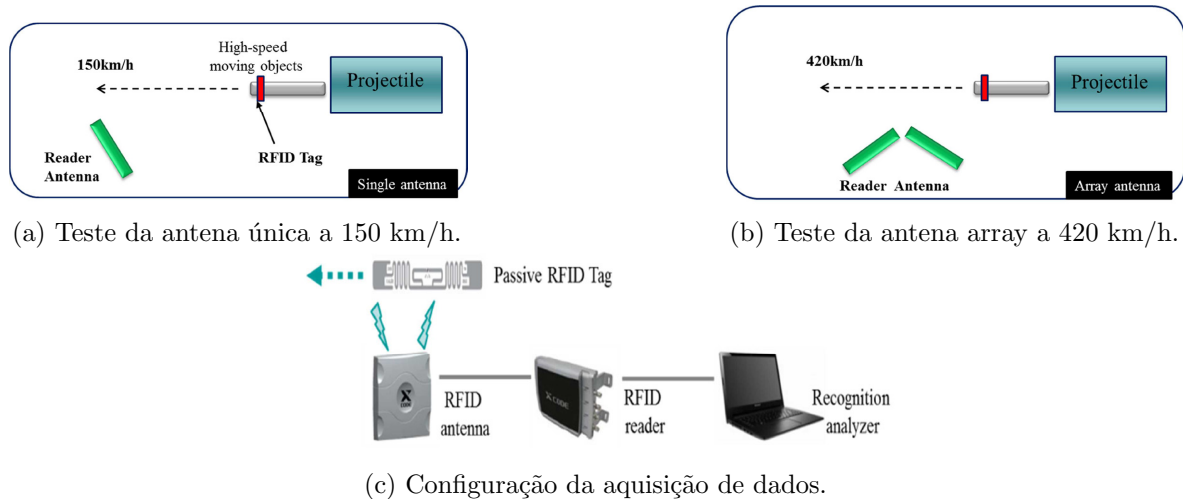


Figura 2.5: Aquisição das condições de teste [17].

As conclusões retiradas foram que, numa estimativa teórica, o alcance de identificação da antena única e do conjunto de antenas seria de 2,5 m e de 3,5 m, respectivamente, o que implicava que a antena array teria um alcance de leitura 1.4 vezes superior que do de uma antena única. Na experiência prática, o alcance para uma antena única era de 2 m e a distância de identificação de uma antena array era de 3 m. Já nas respostas a alta-velocidade, com velocidades entre 150, 200, 300 e 420 km/h, a antena array reconheceu todas as velocidades, enquanto que a antena única não reconheceu a velocidade máxima [17].

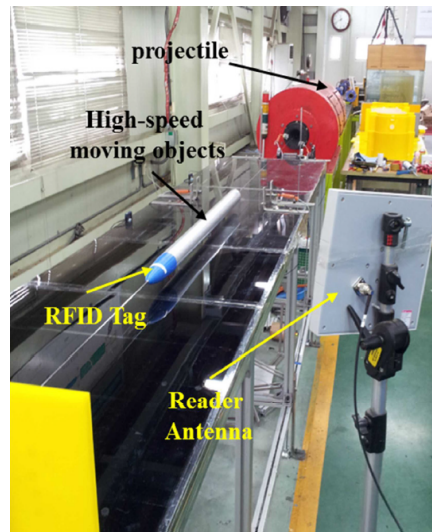


Figura 2.6: Configuração do equipamento RFID de teste [17].

Continuando a temática das aplicações de RFID em ferrovias, o artigo [19] faz um estudo sobre a utilização desta tecnologia na prevenção de acidentes e incidentes em viagens e nas estações. Para tal o comboio era equipado com um RFID reader e com um circuito de controlo com um microcontrolador, assim como era efectuada a colocação de tags RFID activas em pontos específicos (pontos perigosos) do trajecto. Os pontos perigosos incluíam curvas, estações, declives e obstáculos (humanos ou outros comboios). As tags RFID activas eram instaladas nas paredes do túnel, curvas, declives, nas estações e na parte externa da carroçaria das carruagens traseiras. Para os passageiros, a tag poderia ser colocada no telemóvel, smartwatch, smartcard ou smartwristband [19].

Quando o comboio se aproximava dos pontos, o reader de tags verificava o número da tag e o microcontrolador identificava as condições climáticas do ambiente, obtendo as informações da database interna. De seguida, com base nesses dados, o circuito de controlo ajustava a velocidade de rotação do motor eléctrico e consequentemente a velocidade do comboio [20] [21]. Desta forma, a velocidade do comboio é adaptada de forma automática e prontamente às condições e a probabilidade de um acidente em circunstâncias imprevistas é reduzida. Além da infraestrutura de hardware essencial, este sistema requeria um software bem projectado para fazer a gestão e controlo da situação. O software foi implementado e executado no processador do sistema e determina como os comandos do processador controlam o motor eléctrico do comboio [19].

Com as experiências realizadas no modelo implementado, foi possível afirmar que a eficiência do sistema proposto nesse artigo era relativamente eficaz para a redução de desastres, embora o factor mais importante para a segurança e prevenção de incidentes seria sempre o agente humano, neste caso o maquinista. Na primeira experiência, o sistema baseado no método proposto foi aplicado no modelo de comboio. Foram realizadas 60 viagens em réplicas de carris, 16 dos quais em situação de risco (um humano na linha, outro comboio ou uma curva fechada), o que resultou num total de 58 viagens seguras e em apenas 2 acidentes. A mesma experiência foi repetida, mas com o sistema desactivado. Uma vez mais, de 60 viagens, 16 tinham uma situação perigosa. O resultado incluiu 46 viagens seguras e 14 incidentes [19].

O sistema desenvolvido no artigo [22] mostrou-se um método eficaz para a monitorização de infraestruturas ferroviárias. A manutenção de estruturas complexas, como por exemplo a linha férrea, pontes e túneis são essenciais para operações de sistemas ferroviários em segurança, o que obriga à instalação de sistemas de vigilância e análise. No geral, a manutenção das instalações ferroviárias têm sido efectuadas usando um sistema com base em intervalos de tempo Time-Based Maintenance (TBM). Este sistema é útil para manter a condição das instalações ferroviárias a funcionar adequadamente, no entanto, a inspecção e substituição são realizadas em intervalos regulares, e não tendo em conta o estado de deterioramento, o que acarreta trabalho e custo. Já a manutenção condicionada Condition-Based Maintenance (CBM) permite monitorizar rapidamente e constantemente toda a infraestrutura [23] [24]. Os dados de detecção podem não ser usados apenas para encontrar anomalias como também para compreender as condições de cada instalação, o que ajuda a otimizar os intervalos de inspecção e substituição [22].

Contudo, com o aumento do número de instalações de monitorização, aumenta também a recolha de dados pelo sensor, o que exige algum esforço. Como quase todas as instalações estão dispostas discretamente ao longo das linhas ferroviárias, estudou-se um sistema que recorria à comunicação oportunista entre o comboio e a instalação. A comunicação oportunista faz com que um receptor colocado num comboio em movimento recolha automaticamente os dados de monitorização de sensores wireless instalados nas infraestruturas. Para a comunicação, foi usado um tipo de tag RFID activo designado Bluetooth Low Energy (BLE) [22].

O BLE é uma tecnologia wireless, de baixo consumo e de baixo custo, para além de que é capaz de comunicar com quase todos os smartphones, tables e PCs. Como o intervalo de tempo de comunicação era curto quando o comboio passava depressa, foi seleccionada uma topologia de broadcast. Os sensores BLE e os receptores eram definidos como broadcasters (transmissores) e receivers (observadores), respectivamente, por perfis de acesso genérico ou Bluetooth Generic Access Profile (GAP). No sistema de comunicação oportunista, os sensores BLE (broadcasters) montados nas infraestruturas transmitem pacotes de publicidade, juntamente com os dados do sensor de forma periodica, e o receptor no veículo analisa os pacotes de publicidade na área de comunicação, repetidamente (Figura 2.7) [22].

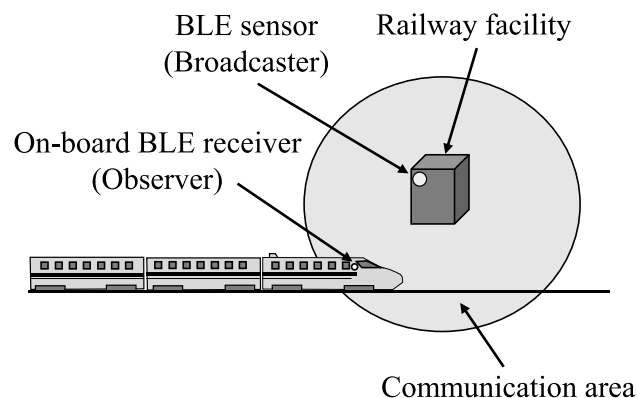


Figura 2.7: Especificações do sistema de comunicação oportunista com uso de BLE [22].

O intervalo para o pacote de publicidade do sensor BLE foi definido para 0.1s e o intervalo de varredura do receptor foi definido para 1s. De forma a confirmar as propriedades teóricas da comunicação, foi efectuado um teste inicial com um carro a alta-velocidade (Figura 2.8a). O número da recepção dos dados foi medido enquanto o veículo passava a uma velocidade constante na área de comunicação. Confirmou-se que os valores experimentais quase corresponderam ao cálculo dos valores até 200 km/h. Posteriormente, foi realizado um teste com um comboio numa linha ferroviária (Figura 2.8b). O BLE foi bem-sucedido no levantamento de valores de temperatura, de fluxo de calor e de aceleração, a uma velocidade de aproximadamente 255 km/h [22].

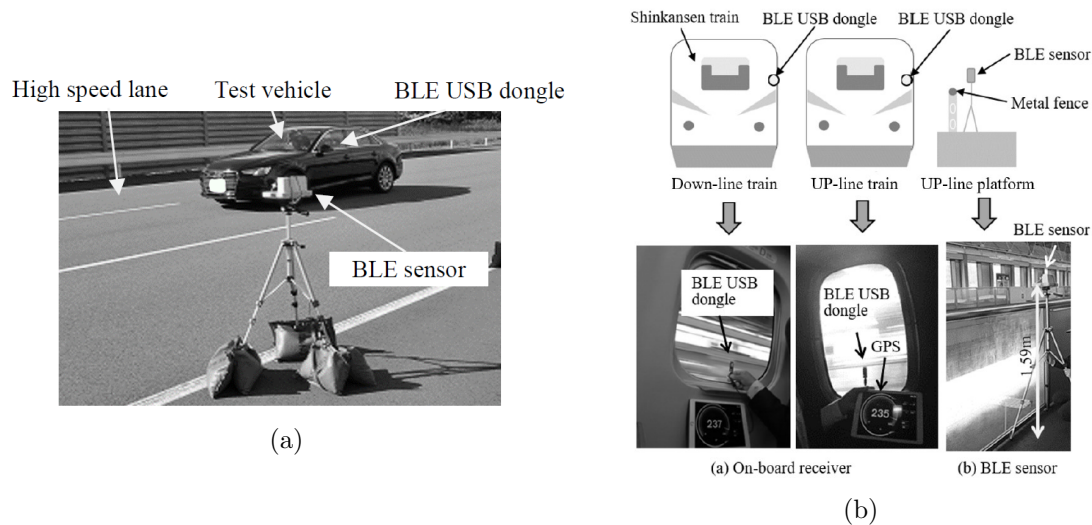


Figura 2.8: Configurações dos testes com um carro (2.8a) e numa linha ferroviária (2.8b) [22].

Outra utilização da tecnologia Radio-Frequency Identification é na discriminação de mercadoria em cenários de armazém, como no artigo [1]. O sistema deste cenário era baseado num conjunto de tags (grid) UHF-RFID colocadas no chão por debaixo do portão, equipadas com uma única antena reader (Figura 2.9a). O movimento da transportadora sombreia as tags de referência, produzindo uma "assinatura" distinguível da sua trajectória, de acordo com uma direcção específica, ou seja, de entrada ou de saída (Figura 2.9b) [1]. Esta assinatura distinguível era usada como input de uma rede neural recorrente ou Recurrent Neural Network (RNN). A arquitectura do sistema proposto explora os efeitos de sombra da transportadora nas tags de referência próximas a ela, o que é predominante no que diz respeito aos fenómenos de multi-percurso [1].

A precisão do teste pode-se aproximar do valor de 100% para uma duração de janela de tempo adequada e tendo em conta os Number of Hidden Units (NHU). Embora outros sistemas de última geração tivessem um desempenho semelhante, a infraestrutura de hardware necessária do sistema proposto era económica e de fácil implementação. Além disso, o sistema era mais robusto contra percursos múltiplos e deve ser adaptável a outros cenários sem a necessidade de voltar a "treinar" a rede. O sistema proposto neste artigo citado pode também encontrar uma aplicação para detectar o movimento de uma empilhadora por pontos de interesse e era capaz de entregar resultados em tempo real, isto é, uma vez treinada a rede neural, a classificação da transportadora pode ser realizada em alguns milissegundos [1].

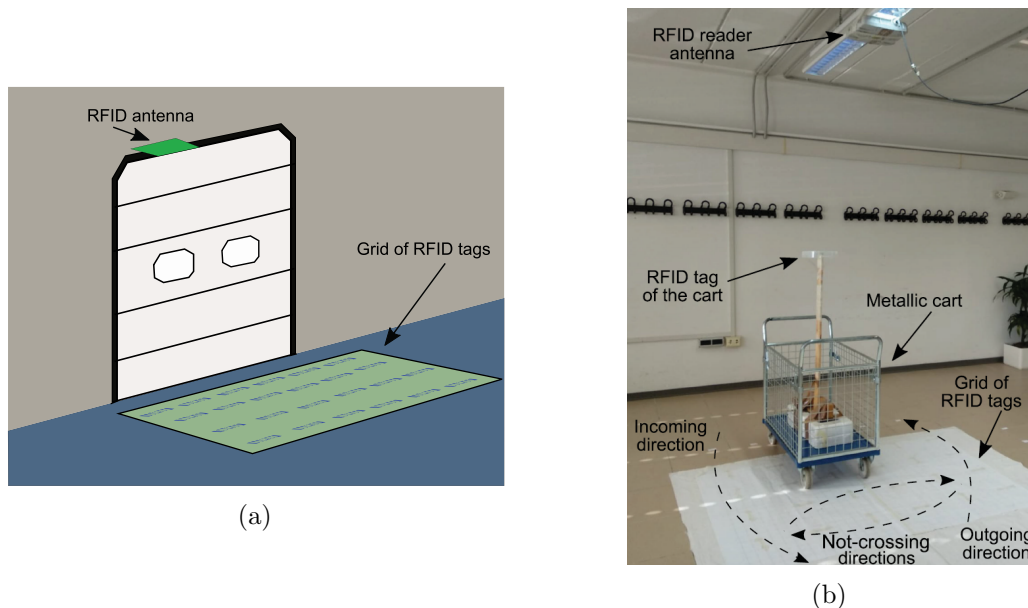


Figura 2.9: Representação do sistema de controlo de um portão UHF-RFID com um reader de antena única e um conjunto (grid) de tags (2.9a) e configuração de medição do sistema proposto (2.9b) [1].

Uma outra utilização de RFIDs com várias vantagens é na medição de temperatura. Em [25] era relevante monitorizar a temperatura de um bombeiro para saber se estavam ou não em risco de stress por excesso de calor. Existem três soluções para medição de temperatura corporal: com uso de termístores e termopares, com dispositivos com comunicação por Bluetooth e com sensores RFID. A primeira hipótese seria pouco confortável pois este tipo de sensores teriam que ser ligados a um dispositivo de medição por fios, o que significa que a melhor solução passa por tecnologia wireless. Das duas hipóteses restantes, a que usa tecnologia RFID é a mais eficiente. Outras vantagens são o facto de ser uma tecnologia barata, pequena, flexível e não intrusiva para a pele (Figura 2.10) [25].

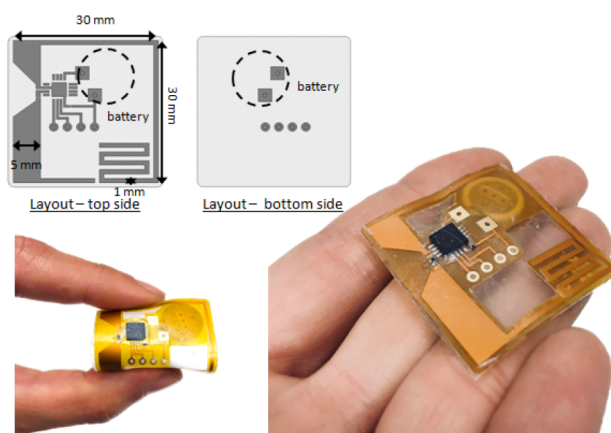


Figura 2.10: Layout do sensor RFID com bateria usando para a medição da temperatura corporal [25].

Durante treinos com simulações de cenários realistas, em 9 bombeiros foram usados 3 sensores, um no capacete (entre o capacete e a bataclava), outro no peito e outro na perna, enquanto que noutro bombeiro foram usados também 3 sensores, um no peito, outro no uniforme e outro no casaco para verificar a protecção conferida pelo equipamento (Figura 2.11). Os resultados revelam um aumento da temperatura corporal e da temperatura do equipamento, mostrando-se assim fiáveis e não intrusivos à actividade física [25].

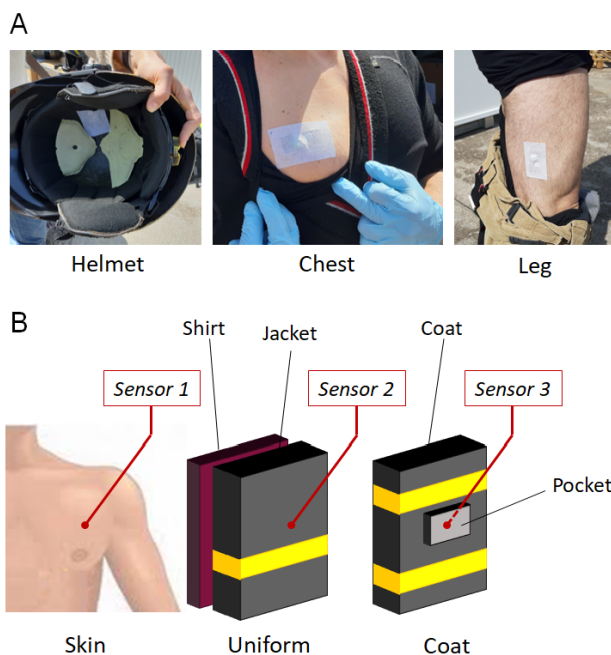


Figura 2.11: Posicionamento dos RFID na pele ou no equipamento dos bombeiros [25].

Uma outra área de grande consumo de tecnologia RFID são os serviços de saúde. Nesta área, existem também alguns estudos sobre a utilização de RFID para medição de temperatura. No primeiro caso, [26], foi sugerida a utilização de tags RFID como uma "tatuagem" para a monitorização de pessoas possivelmente infectadas por coronavírus, uma vez que a febre é um dos principais sintomas iniciais. O protótipo da tatuagem RFID mostrou-se eficaz na medição da temperatura corporal de 36^o a 40^oC, sendo assim uma opção viável para triagem e análises em larga escala. Pelos materiais que usava, como papel de alumínio e fita adesiva, era um dispositivo descartável, de baixo custo, com durabilidade de utilização por mais de 3 dias e era operacional na faixa de frequências UHF dos RFID.

Um outro estudo, [27], era sugerido um sistema de baixo custo para automatizar a prova de marcha de 6 minutos baseado em várias tecnologias, incluindo RFID, para o auxílio de profissionais de saúde na avaliação de pacientes cardiopulmonares, com especial atenção para quem já tivesse sido infectado por coronavírus. A prova de 6 minutos avalia os níveis de oxigénio, a frequência cardíaca e a pressão arterial, que estima a morbilidade e mortalidade em doentes com alterações cardiovasculares ou pulmonares [28]. O sistema desenvolvido permitia a monitorização precisa e em simultâneo de vários pacientes e reduzia o trabalho manual realizado no teste tradicional. Assim, com a implementação de RFID, os erros médicos e humanos em hospitais e outros serviços de saúde podem ser reduzidos, assim como permite o aprimoramento de exames e obtenção de ter diagnósticos mais rápidos [27].

O artigo [29] explora a necessidade de vigiar, catalogar e localizar com exactidão e rapidez o material hospitalar, a maioria de elevado valor, o que levou ao desenvolvimento de uma antena RFID microstrip (mais especificamente um reader), para que pudesse ser facilmente lida e monitorizada. No Capítulo 4 são abordadas com mais incidência as antenas microstrip.

Capítulo 3

Rádio Definido por Software

Este capítulo tem como objectivo apresentar e explicar de forma resumida a tecnologia SDR e o seu funcionamento, assim como apresentar uma breve análise aos dispositivos e softwares existentes actualmente.

3.1 Introdução e Funcionamento

Com os avanços modernos em tecnologias de computação, processamento digital de sinais e algoritmos de comunicação digital, RF, design de hardware e muitos outros elementos, os sistemas de comunicação modernos evoluíram para sistemas complexos, inteligentes e de alto desempenho [30]. Uma das tecnologias a aparecer neste âmbito foi o Rádio Definido por Software ou Software Defined Radio (SDR). O SDR é um rádio em que algumas ou todas as funções da camada física são controladas por software [30] [31]. Sendo um transmissor e/ou receptor com hardware reconfigurável por software, este possui a capacidade de implementar diferentes funções em diferentes alturas usando sempre a mesma plataforma. Normalmente, o rádio pode ser configurado para seleccionar a frequência central, a taxa de amostragem, a largura de banda, o tipo de modulação, o protocolo de comunicação, entre outros parâmetros para transmitir e receber sinais de interesse [32] [33].

As características-chave que geralmente definem um SDR são a sua multifuncionalidade, isto é, possuem a capacidade do software de um só SDR suportar várias tecnologias de rádio e de realizar processamento de sinal usando sempre a mesma plataforma de hardware, para além de que reduz a complexidade do hardware em comparação com outras soluções de rádio mais tradicionais. Outra característica é a mobilidade global, ou seja, não estar confinado a apenas um standard e compactidade/ eficiência energética, uma vez que muitos protocolos de comunicação podem ser compatíveis com apenas um SDR. A facilidade de fabricação e a facilidade de actualização são outras características-chave a ter em conta neste tipo de sistema de rádio [32] [34].

Por outro lado, os SDR também têm inconvenientes, como por exemplo a sincronização do relógio das ADC e DAC com o relógio dos dispositivos do Processamento Digital de Sinal ou Digital Signal Processor (DSP), de forma a evitar incompatibilidades nas frequências de amostragem ou, caso o SDR seja usado para fins maliciosos, existe a possibilidade de interferências em canais cuja banda de frequência seja reservada a serviços de emergência ou de segurança [35].

Em termos de funcionamento, um Software Defined Radio ainda requer algum hardware, mas esse hardware é apenas usado para apenas receber e transmitir sinais de rádio. No total, um sistema SDR consiste numa antena, num transmissor e/ou receptor e num PC ou host [36].

O processador é responsável pelo DSP, programado por software. Caso o SDR esteja a transmitir, o sinal que vem do processador vai ser convertido para o domínio analógico por meio de um Conversor Digital-Analógico ou Digital-to-Analog Converter (DAC). Por outro lado, caso esteja a receber, o sinal vindo do RF Front-End vai ser uma vez mais convertido para o domínio digital por meio de um Conversor Analógico-Digital ou Analog-to-Digital Converter (ADC). O bloco RF Front-End é o responsável pela transmissão e recepção do sinal e pelo acoplamento entre o rádio e a antena [32] [35].

No transmissor (Figura 3.1), os dados a transmitir são gerados no PC e transmitidos através de uma interface, por norma USB ou Ethernet. O software instalado no host realiza todas as operações de processamento de sinal, como por exemplo a modulação e codificação. De seguida, o sinal digital em banda base é convertido em sinal analógico através de um DAC. Os sinais I e Q passam no filtro e modulam as portadoras em fase e em quadratura, produzidas pelo Oscilador Local ou Local Oscillator (LO), por via do Misturador ou Mixer. Por fim, o sinal entra no bloco RF Front-End, onde vai ser executado o deslocamento do espectro do sinal para a frequência de transmissão pretendida, para depois ser amplificado no Amplificador de Potência ou Power Amplifier (PA) e emitido pela antena [32] [35].

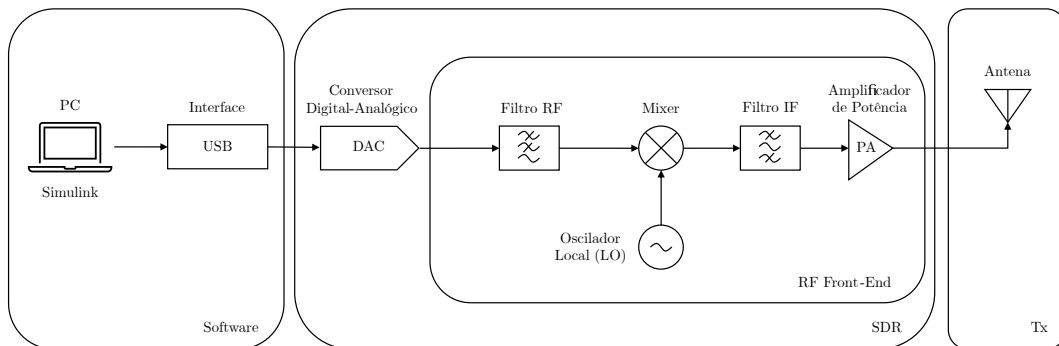


Figura 3.1: Diagrama de blocos de um transmissor SDR, baseado em [36].

Já no receptor (Figura 3.2), a antena faz a captação do sinal RF e este é conduzido para o bloco RF Front-End, onde o sinal recebido é deslocado em frequência para a banda base. O Amplificador de Baixo Ruído ou Low-Noise Amplifier (LNA) é usado para amplificar os sinais de baixa amplitude, sem se ter o inconveniente do aumento significativo de ruído. O sinal é convertido em sinais I e Q no Mixer com os sinais RF produzidos pelo LO e, de seguida, o sinal analógico é convertido em sinal digital através de um ADC. Por fim, os dados obtidos são enviados para o PC, que realiza as operações de processamento de sinal como por exemplo a desmodulação e decodificação, de forma a recuperar o sinal enviado inicialmente pelo transmissor [32] [35].

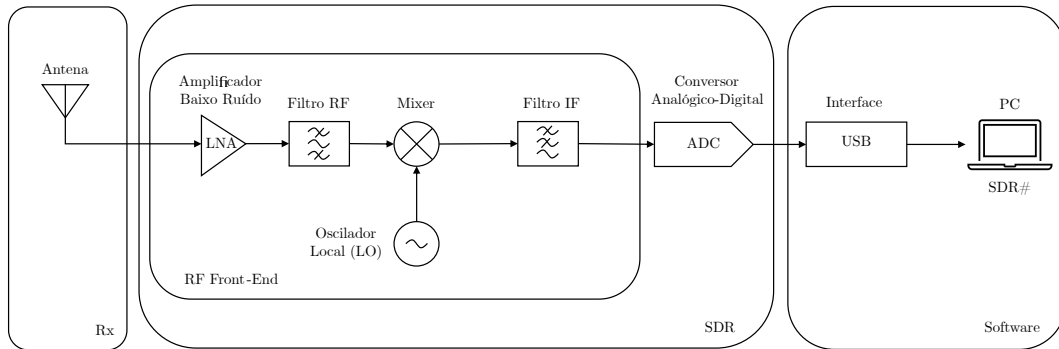


Figura 3.2: Diagrama de blocos de um receptor SDR, baseado em [36].

3.2 Dispositivos e Softwares

Hoje em dia existe uma elevada oferta de periféricos SDR comerciais. Para esta dissertação havia a possibilidade de se recorrer a um dos seguintes quatro dispositivos (Figura 3.3), o ADALM-PLUTO da Analog Devices (3.3a), o RTL-SDR da RTL-SDR.com (3.3b) ou um dos USRP da Ettus Research (3.3c) (3.3d).



(a) ADALM-PLUTO [37].



(b) RTL-SDR RTL2832U [38].



(c) USRP B210 [39].



(d) USRP N310 [40].

Figura 3.3: Dispositivos SDR.

A Tabela 3.1 (adaptado de [35]) ajuda a comparar as características de cada um dos dispositivos acima referidos.

	ADALM-PLUTO	RTL-SDR	USRP B210	USRP N310
Cobertura RF	325 MHz - 3.8 GHz	500 kHz - 1766 MHz	70 MHz - 6 GHz	10 MHz - 6 GHz
Largura de Banda	20 MHz	2.4 MHz	56 MHz (1x1)/ 30.72 MHz (2x2)	100 MHz (4x4)
Resolução (ADC/DAC)	12 bits	8 bits	12 bits	16 bits / 14 bits
Taxa de Amostragem (ADC/DAC)	61.44 MS/s	3.2 MS/s	61.44 MS/s	122.88, 125, 153.6 MS/s
Tx/Rx	1 / 1	- / 1	2 / 2	4 / 4
Duplex	Half ou Full	-	Half ou Full	Half ou Full
FPGA	Xilinx Zynq-7000	-	Xilinx Spartan 6 XC6SLX150	Xilinx Zynq-7100 SoC
Interface	USB 2.0 OTG	USB 2.0	USB 3.0 SuperSpeed	SFP+/Ethernet
Software(s)	MATLAB, Simulink, GNU Radio	MATLAB, Simulink, GNU Radio	MATLAB, Simulink, LabVIEW, GNU Radio	MATLAB, Simulink, LabVIEW, GNU Radio
Preço	≈ 100€	≈ 20€	≈ 1600€	≈ 12000€

Tabela 3.1: Características dos dispositivos SDR referenciados [41][42][43][44].

Ao analisar as características de cada um, a escolha recaiu no ADALM-PLUTO, pois é um aparelho compacto, apresenta a melhor relação qualidade-preço dos quatro e já é um dispositivo utilizado na unidade curricular de Sistemas de Informação [45]. O RTL-SDR, apesar de ser mais barato, tem a grande desvantagem de só ser receptor, isto é, não efectua transmissão e os USRP B210 e N310 são muito mais dispendiosos e são mais difíceis de transportar (N310).

As Figuras 3.4 e 3.5 apresentam, respectivamente, o diagrama de blocos e o interior do ADALM-PLUTO, e o seu diagrama de blocos de um sistema SDR, com base nos diagramas das Figuras 3.1 e 3.2.

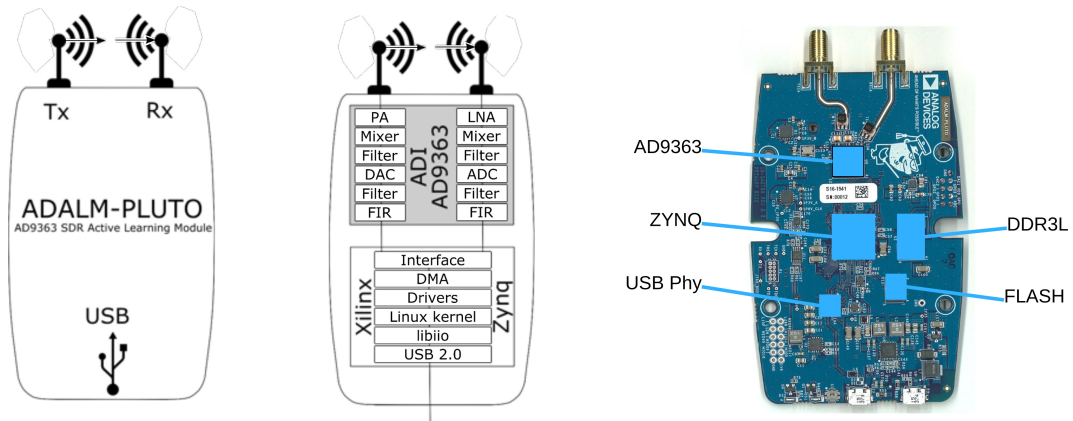


Figura 3.4: Diagrama de blocos do ADALM-Pluto e o seu interior [46].

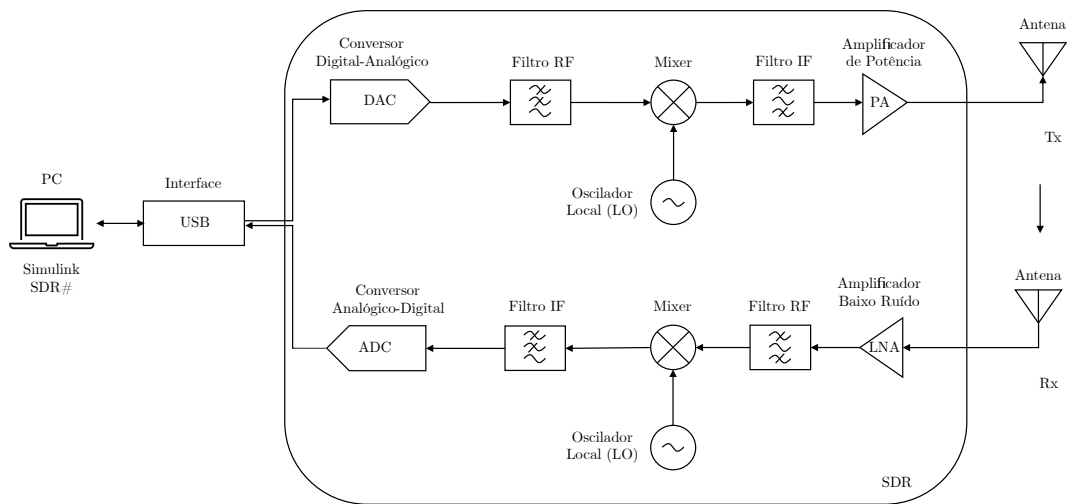


Figura 3.5: Diagrama de blocos de um sistema SDR (ADALM-Pluto).

A Tabela 3.2 (adaptado de [35]) exhibe as principais especificações do ADALM-PLUTO.

Especificação	Valor Típico
Fonte de Alimentação	4.5 V - 5.5 V
Interface	USB 2.0 OTG
Taxa de Amostragem (ADC/DAC)	65.2 kS/s - 61.44 MS/s
Resolução (ADC/DAC)	12 bits
Precisão de Frequência	± 25 ppm
Cobertura RF	325 MHz - 3.8 GHz
Potência de Saída (Tx)	7 dBm
Figura de Ruído (Rx)	<3.5 dB
EVM (Tx/Rx)	-34 dB (2%)
Proteção RF	Não
Core	Single ARM Cortex-A9 @ 667 MHz
Transceiver	Analog Devices AD936x RF Agile Transceiver
FPGA	Xilinx Zynq-7000 (28k Células Lógicas)
Memória Flash	Micron QSPI Flash MT25QU256ABA (32 MB)
Memória RAM	Micron DDR3L MT41K256M16 (512 MB)
Dimensões	117 mm \times 79 mm \times 24 mm
Peso	114 g
Temperatura de Operação	10°C - 40°C

Tabela 3.2: Especificações principais do ADALM-PLUTO [41].

Como referido anteriormente, a tecnologia Software Defined Radio tem como base o uso de software, que é o que programa o processador. O ADALM-PLUTO tem a vantagem de ser multiplataforma, isto é, pode ser utilizado em Windows, Linux ou macOS. Para o desenvolvimento e testagem de funções de transmissão e/ou recepção de dados e processamento de sinal, esta tecnologia necessita de um software que seja eficiente e confiável.

Um software que atende a tal requisito é o Matrix Laboratory (MATLAB) da MathWorks. O MATLAB é um ambiente técnico de computação numérica e programação, via código fonte (script), que permite o desenvolvimento de algoritmos, criação de gráficos ou análise de dados, entre outros [47]. Um produto adicional, Communications Systems Toolbox, adiciona algoritmos da camada física, modelos de canal, modelos de referência e conectividade com hardware SDR para transmitir e receber sinais. A MathWorks também oferece o Simulink, que é um ambiente gráfico de simulação de sistemas e de geração automática de código para implementação em hardware e software [32] [47]. De referir que a Universidade de Aveiro disponibiliza uma licença de utilização académica do MATLAB, Simulink e todas as suas Toolboxes.

Outra arquitectura de software SDR é o GNU Radio, de código aberto (open-source), que fornece blocos de processamento de sinal. Pode ser usado tanto com um dispositivo RF externo para criar um SDR, como pode ser usado sem hardware, em contexto de ambiente de simulação. Os blocos no GNU Radio podem ser usados com linguagem de programação Python ou C++. É amplamente usado em ambientes amadores, académicos, de investigação e industriais, quer em sistemas de comunicação wireless, quer em sistemas de rádio [32] [48].

O Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabVIEW), da National Instruments, é um ambiente de programação em linguagem G (programação gráfica), isto é, não é uma programação escrita, o que facilita a interação virtual de hardwares, possibilitando

a análise de dados e o processamento de sinais de uma forma mais eficiente [49]. Quando comparado com o GNU Radio, o LabVIEW tem a desvantagem de ser um software pago e de custo elevado.

Para visualizar o espectro de sinal recebido, também existem softwares como o SDR# (SDRSharp) da Airspy [50].

Capítulo 4

Antena

Este capítulo aborda o conceito básico de uma antena, as suas categorias e o desenvolvimento das antenas CPW usadas no sistema a implementar.

4.1 Introdução e Funcionamento

Conforme mencionado no Capítulo 2, a antena faz parte da composição típica das tags e transponders RFID. Uma antena é um dispositivo passivo dos sistemas de rádio que permite a transmissão de informação por ondas electromagnéticas. Por outras palavras, é uma estrutura de transição entre um sistema guiado de ondas e o meio livre (Figura 4.1). Este elemento pode ser caracterizado por um determinado ganho, pela adaptação e pelo diagrama de radiação [51].

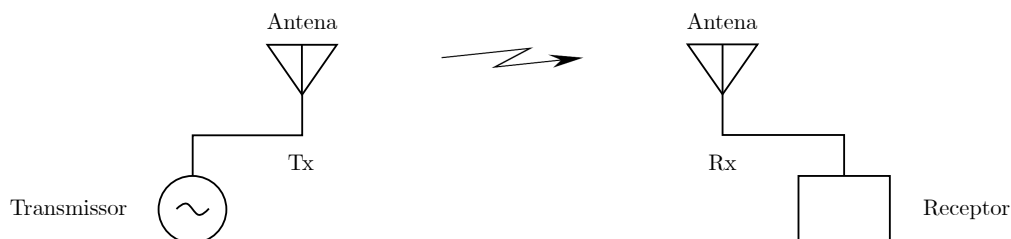


Figura 4.1: Diagrama básico de um sistema de comunicação por ondas electromagnéticas, em meio livre. A antena é uma interface de transição entre o meio livre e um sistema de guiagem de ondas.

O dispositivo de orientação ou linha de transmissão pode assumir a forma de um cabo coaxial, de uma linha impressa, de uma linha bifilar ou de um condutor metálico oco (guia de ondas), e é usado para transportar energia eletromagnética do transmissor da fonte para a antena (quando é uma antena de transmissão) ou da antena para o receptor (quando é uma antena receptora) [52] [53].

As antenas podem ser categorizadas por [51]:

- Geometria e Formas:
 - Antenas Lineares: Dipólo, Monopólo, Helicoidais, etc.;
 - Antenas de Abertura: Corneta e Slot;
 - Antenas Planares: Microstrip (Patch).
- Ganho:
 - Baixo Ganho: Dipólos e Patches;
 - Ganho Médio: Cornetas;
 - Elevado Ganho: Parábola reflectora.
- Diagrama de Radiação:
 - Omnidirecionais;
 - Directivas.

O estudo desta dissertação incidiu mais pelas antenas Microstrip ou Patch. Uma antena microstrip (Figura 4.2) é, tal como o nome indica, uma linha impressa de dimensões reduzidas e com propriedades de radiação. Algumas aplicações requerem características de radiação que não são possíveis de se obter com um só elemento. Porém, um agregado de elementos radiantes num arranjo eléctrico e geométrico (array) permite que se obtenha as características de radiação desejadas [53].

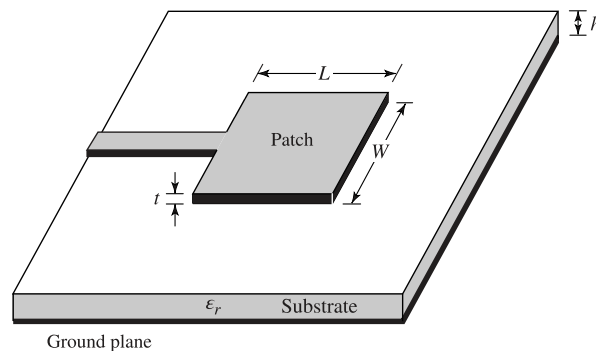


Figura 4.2: Antena Microstrip (Patch) em forma rectangular [53].

Este tipo de antenas são bastante populares porque são discretas, isto é, são de fácil adaptação em vários tipos de superfície planar e não planar, têm uma boa robustez mecânica, são de fácil fabrico em circuito impresso e de custo reduzido. São utilizadas actualmente em várias aplicações comerciais (comunicações por satélite, comunicações móveis, aplicações biomédicas, etc.) e militares (aviação, embarcações e mísseis), em frequências acima de 300 MHz. Porém, apresentam algumas inconveniências como a baixa eficiência, baixa gestão de potência, polarização fraca e banda de utilização estreita [51].

4.2 Antena Guia de Ondas Coplanar

O tamanho e o custo da antena são dois fatores significativos ao projetar qualquer tipo de antena. A antena Guia de Ondas Coplanar ou Coplanar Waveguide (CPW) é uma técnica de aproveitamento da superfície de antenas Patch de forma a aumentar a sua eficiência ou ganho, ao implementar a antena patch e o plano de ground no mesmo lado do substrato. As antenas CPW apresentam-se como uma boa solução, pois podem ser reconfiguradas em diferentes frequências de ressonância, para fornecer várias funções [54].

4.2.1 Design e Medições

Para a transmissão e recepção entre os SDRs, foram desenvolvidas e utilizadas duas antenas CPW similares. A Figura 4.3 mostra a projecção e a antena final já produzida. A simulação dos diagramas de radiação para as duas frequências estão representadas na Figura 4.4. A projecção das antenas e simulação dos diagramas de radiação foram efectuadas com recurso ao software CST Studio Suite.

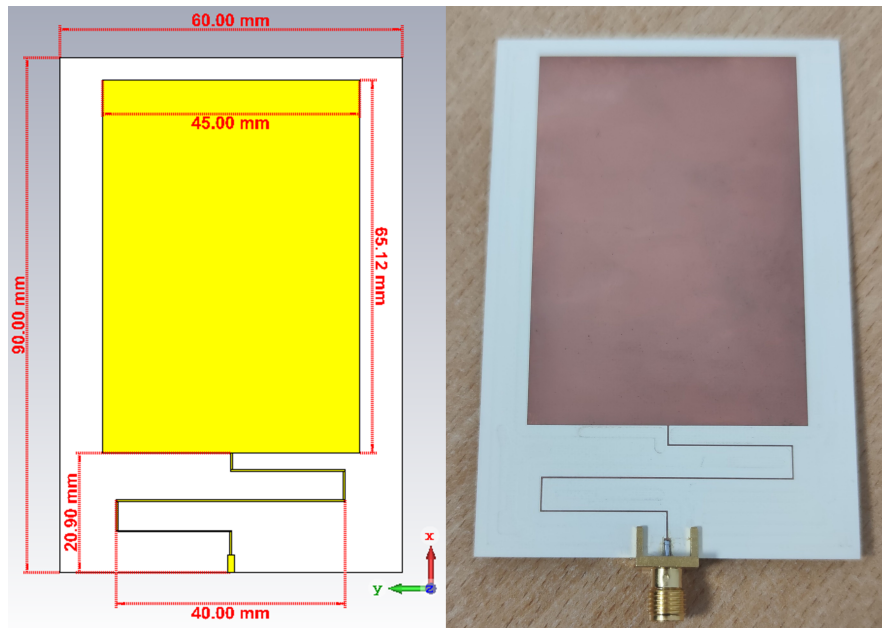
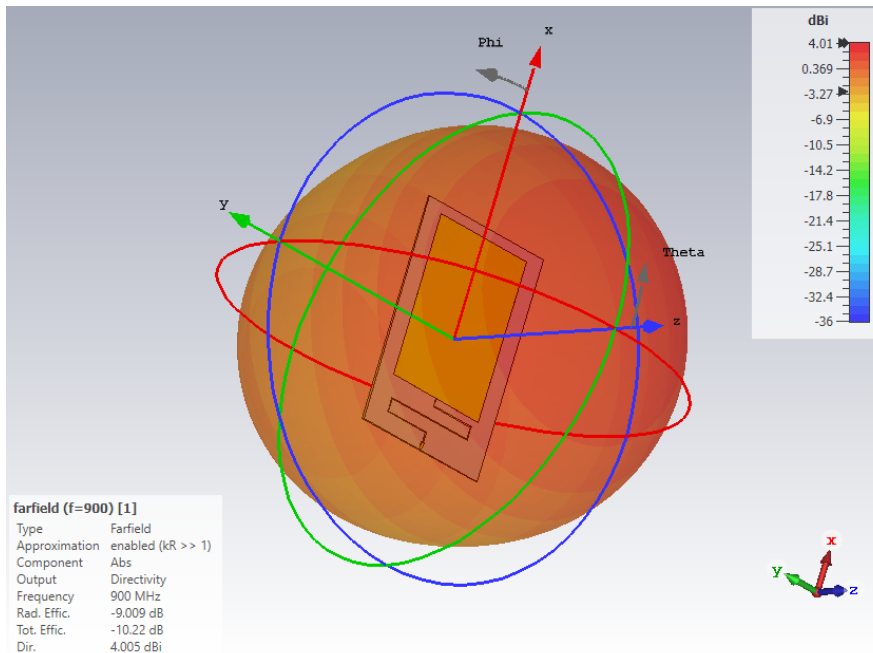


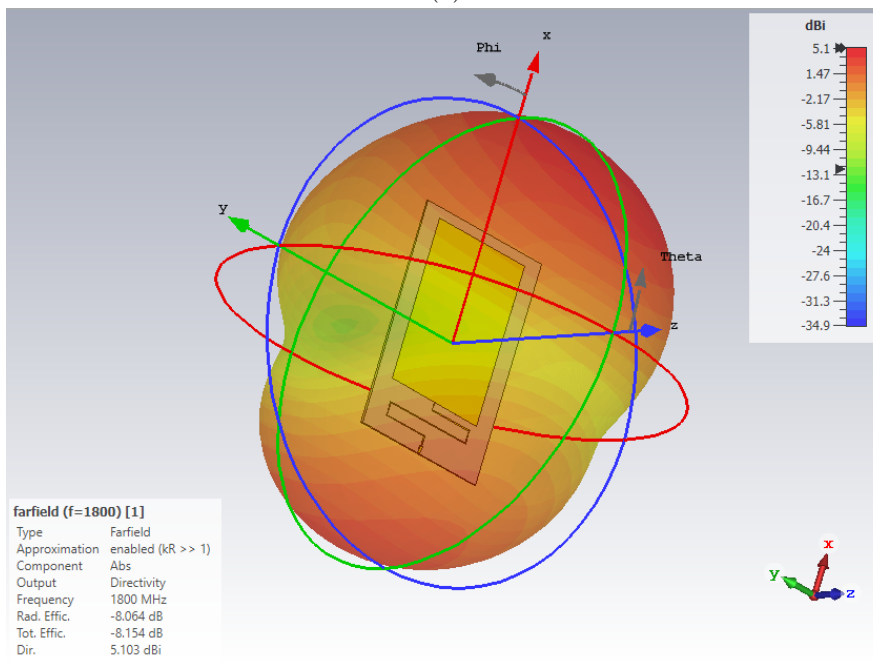
Figura 4.3: Antena projectada e produzida.

As características principais das antenas são:

- Frequências de Operação: 900 MHz e 1.8 GHz (frequências standard utilizadas em sistemas RFID e GSM, respectivamente);
- Polarização: Linear;
- Ganho: 4.005 dBi (900 MHz) e 5.103 dBi (1.8 GHz) .



(a)



(b)

Figura 4.4: Diagramas de radiação da antena a 900 MHz (4.4a) e a 1.8 GHz (4.4b).

Para calcular o comprimento de onda (wavelength) e as distâncias de campo distante (far field) e de campo próximo (radiating near field distance & reactive near field distance), recorre-se às seguintes fórmulas:

$$\lambda = \frac{\text{Velocidade da luz}}{\text{Frequência}} \quad (4.1)$$

$$\text{Far Field} \geq \frac{2 \cdot D^2}{\lambda} \quad (4.2)$$

$$\text{Radiating Near Field (Zona de Fresnel)} \leq \frac{2 \cdot D^2}{\lambda} \quad (4.3)$$

$$\text{Reactive Near Field} \leq 0.62 \cdot \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (4.4)$$

em que:

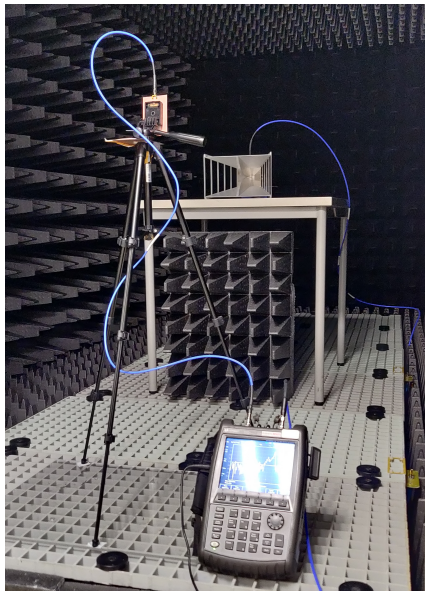
- D = Comprimento da antena;
- λ = Comprimento de onda (electromagnética);
- c = Velocidade da luz no vácuo = $299792458 \text{ m/s} \sim 300000000 \text{ m/s}$;
- f = Frequência de onda, em Hz .

Tendo em consideração que o comprimento da antena é de 9 cm e as frequências de operação são de 900 MHz e 1.8 GHz, os cálculos do comprimento de onda, da distância de campo distante, da distância de radiação de campo próximo e da distância do campo reactivo próximo estão representados na Tabela 4.1:

	900 MHz	1.8 GHz
Wavelength	<i>33 cm</i>	<i>17 cm</i>
Far Field	$\geq 5 \text{ cm}$	$\geq 10 \text{ cm}$
Radiating Near Field Distance	$\leq 5 \text{ cm}$	$\leq 10 \text{ cm}$
Reactive Near Field Distance	$\leq 3 \text{ cm}$	$\leq 4 \text{ cm}$

Tabela 4.1: Cálculos das distâncias near field, far field e do comprimento de onda da antena, a 900 MHz e a 1.8 GHz.

Com as antenas produzidas, seguiram-se as medições dos parâmetros S, com recurso a uma câmara anecóica e a um Vector Network Analyzer (Figura 4.5):



(a)



(b)

Figura 4.5: Medição das características da antena efectuada dentro de uma câmara anecóica (4.5a) e parâmetros S obtidos com recurso a um VNA (4.5b).

A Figura 4.6 mostra a comparação dos parâmetros S11 (coeficiente de Return Loss (RL) à entrada) simulados com os parâmetros obtidos.

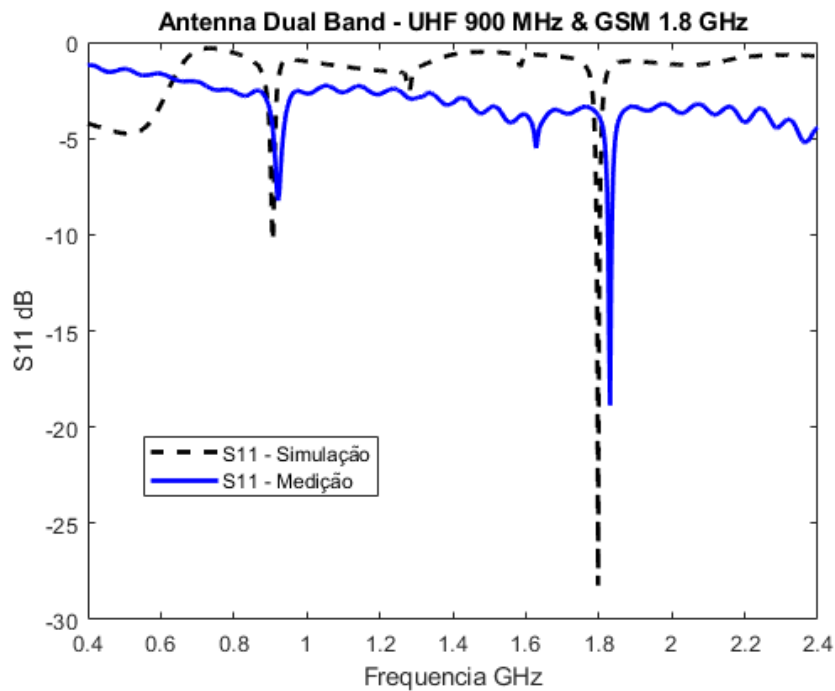


Figura 4.6: Comparação entre os parâmetros S11 simulados e medidos.

A Figura 4.6 mostra que o coeficiente de reflexão simulado a 900 MHz é de -11.0 dB e a 1.8 GHz é de -28.9 dB, ao passo que os valores práticos obtidos foram um coeficiente de reflexão de -8.6 dB a 921 MHz e de -17.5 dB a 1.83 MHz. Se na primeira frequência o valor é suficientemente próximo do valor teórico, já na segunda frequência o desvio significativo entre o valor teórico do coeficiente e o valor obtido experimentalmente pode ser justificado devido a um erro de calibração da broca usada para o recorte da placa.

A mesma figura também comprova o que já era expectável na simulação dos diagramas de radiação sobre o facto de a antena estar mais bem adaptada para a frequência de 1.8 GHz do que a 900 MHz.

Capítulo 5

Configurações, Medições e Resultados

Este capítulo apresenta a aplicação dos planos propostos na Secção 1.2, as configurações (setups) de medições efectuadas e apresenta os resultados obtidos e respectiva análise.

5.1 Configurações

Conforme visto no Capítulo 3, um SDR, no caso concreto o ADALM-PLUTO, pode ser usado como transmissor ou como receptor. Partido do diagrama da Figura 3.5, o sistema a implementar (transmissão-recepção) pode ser resumido na configuração (setup) representada no diagrama da Figura 5.1.

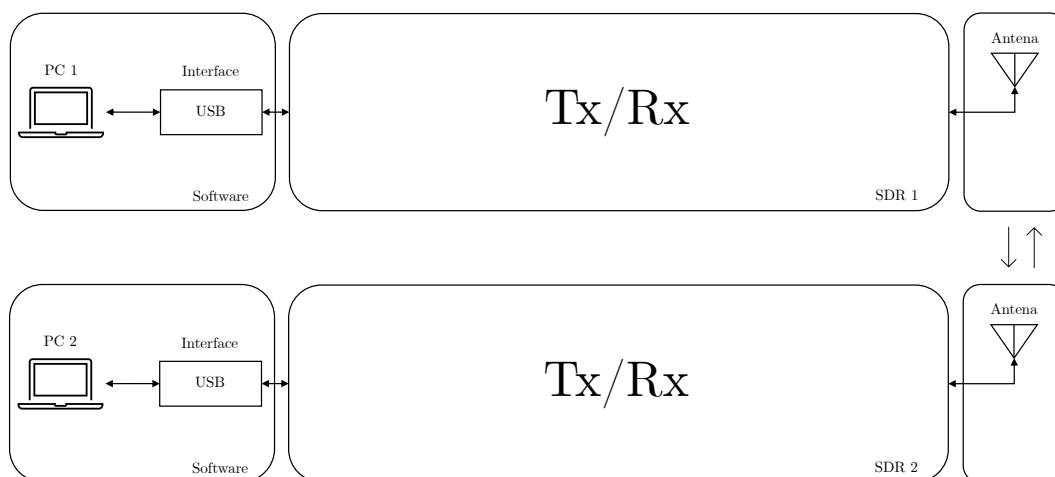


Figura 5.1: Diagrama de blocos simplificado da configuração utilizada, para transmissão-recepção entre SDRs.

O objectivo das medições efectuadas é obter transmissão-recepção com dois ADALM-PLUTO e com as antenas desenvolvidas, com uma frequência de operação de 900 MHz e de 1.8 GHz, e observar o impacto causado com a variação da distância entre as antenas. A transmissão-recepção foi efectuada em frequência central e em formatos de modulação BPSK e QPSK.

Nas medições efectuadas para 900 MHz, o setup é demonstrado no diagrama da Figura 5.2.

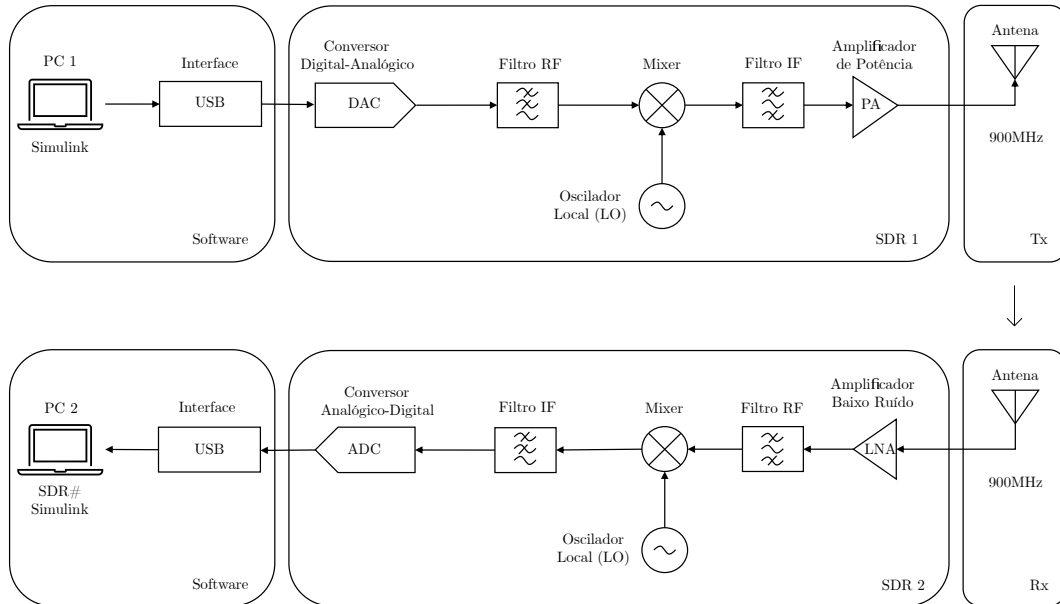


Figura 5.2: Diagrama de blocos da configuração usada para as medições efectuadas a 900 MHz.

Já nas medições a 1.8 GHz, o setup é representado pelo diagrama da Figura 5.3.

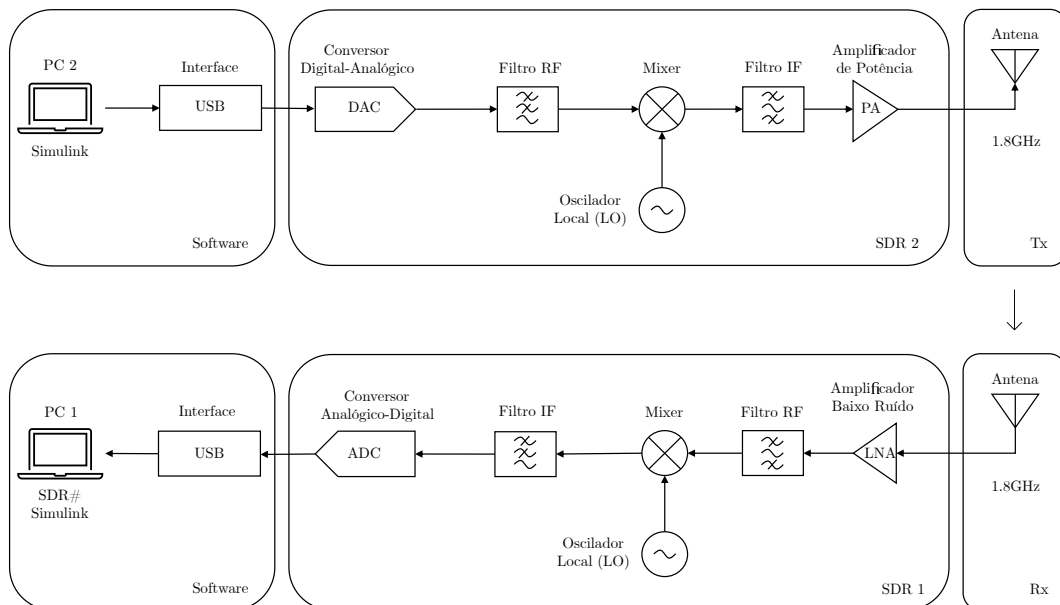


Figura 5.3: Diagrama de blocos da configuração usada para as medições efectuadas a 1.8 GHz.

O equipamento utilizado nas medições foram:

- 2x PC;
- 2x Cabo USB;
- 2x ADALM-PLUTO;
- 2x Cabo SMA;
- 2x Splitter;
- 2x Antena.

A Figura 5.4 é ilustrativa de parte do equipamento utilizado.



Figura 5.4: SDR ADALM-PLUTO acoplado a uma das antenas desenvolvidas.

Um dos objectivos era verificar a influência da distância entre as antenas com os valores de transmissão-recepção. A Figura 5.5 é representativa da variação da distância na configuração utilizada, com uma distância inicial entre antenas de 20 cm e com uma incrementação de 20 em 20 cm até ao valor final de 1 m.



(a) 20 cm.



(b) 40 cm.



(c) 60 cm.



(d) 80 cm.



(e) 1 m.

Figura 5.5: Variação da distância entre as antenas.

5.2 Medições

Conforme mostrado nas Figuras 5.2 e 5.3, quando a frequência é de 900 MHz, o PC 1 é o transmissor e o PC 2 é o receptor. Quando a frequência é de 1.8 GHz, o PC 2 é o transmissor e o PC 1 é o receptor. Na Figura anterior (5.5), o PC da esquerda é sempre o 1 e o da direita é sempre o 2.

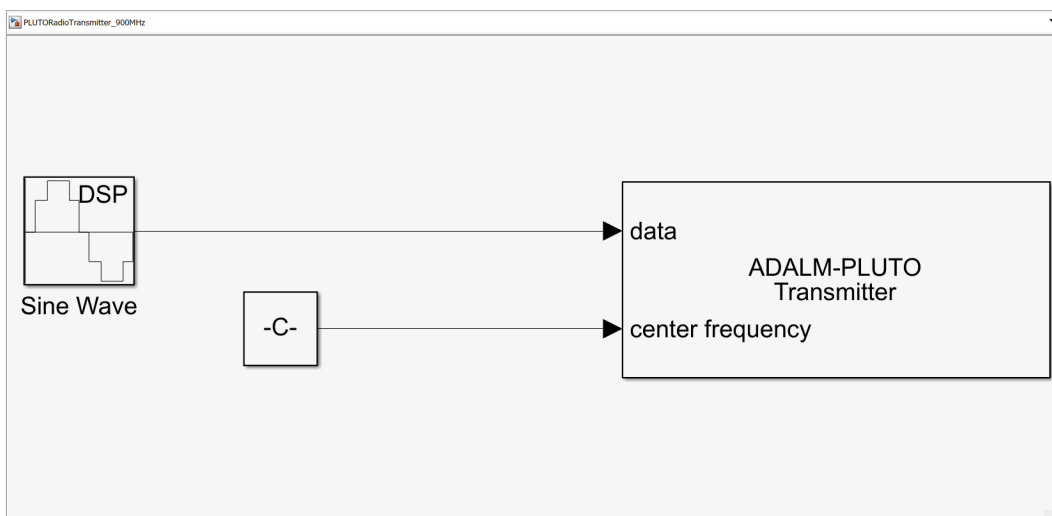
O modelo de transmissão entre os ADALM-Pluto a 900 MHz e a 1.8 GHz foi com recurso ao software Simulink e foi baseado em [55]. Para a parte da recepção foi utilizado o software SDR#. A transmissão está demonstrada nas subsecções 5.2.1 (900 MHz) e 5.2.2 (1.8 GHz).

Para a transmissão-recepção em modulação BPSK e em QPSK, os modelos de transmissão e de recepção foram com recurso ao software Simulink. Os modelos BPSK foram baseados em [45] e estão representados nas subsecções 5.2.3 (900 MHz) e 5.2.4 (1.8 GHz). Já os modelos QPSK foram baseados em [45], [56] e [57] e são demonstrados nas subsecções 5.2.5 (900 MHz) e 5.2.6 (1.8 GHz).

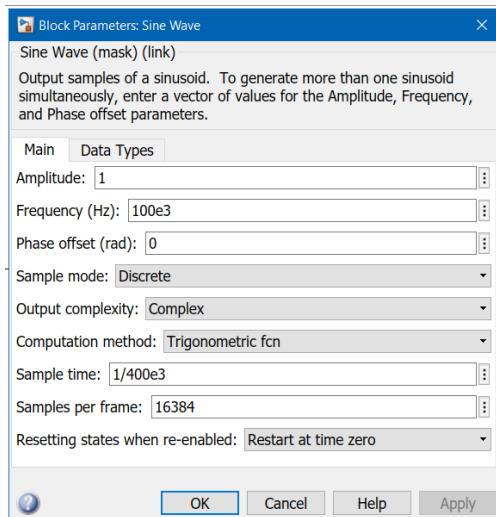
De referir que, tal como visto anteriormente na simulação da antena projectada, a 1.8 GHz há um deslocamento de frequência, em que o valor prático de coeficiente de reflexão máximo era para a frequência de 1.83 GHz, e a diferença entre o valor máximo teórico e experimental era considerável. Como tal, o valor usado para as medições, isto é, nas constantes dos blocos de transmissão e recepção do ADALM-PLUTO foi de 1.83 GHz, embora nesta dissertação refira sempre o valor como sendo 1.8 GHz. Para a frequência de 900 MHz, o deslocamento do valor de coeficiente de reflexão máximo não era tão significativo, daí se ter usado o valor definido teoricamente.

5.2.1 Transmissão e Recepção a 900 MHz

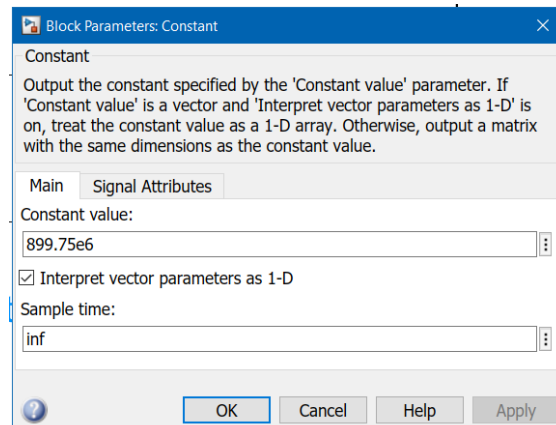
A Figura 5.6 apresenta o sistema de transmissão com as antenas, a 900 MHz.



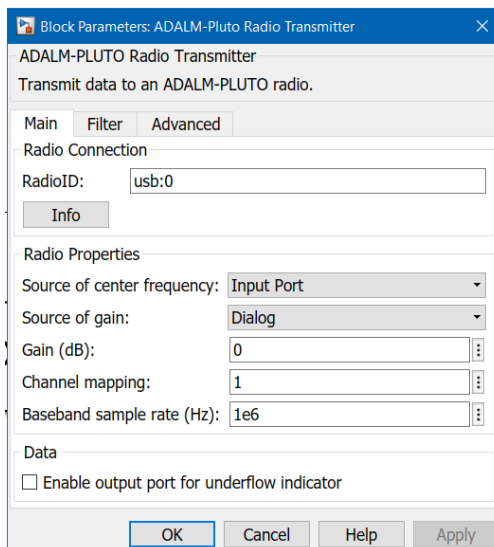
(a) Sistema de transmissão a 900 MHz.



(b) Parâmetros do bloco da onda sinusoidal.



(c) Parâmetros da constante (frequência) utilizada no bloco de transmissão.



(d) Parâmetros do bloco de transmissão.

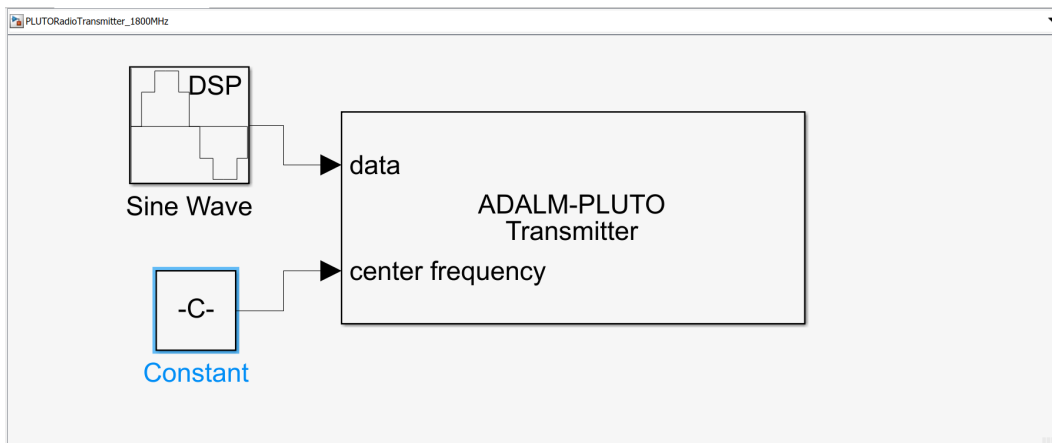
Figura 5.6: Sistema de transmissão do ADALM-Pluto a 900 MHz, com blocos do Simulink e respectivos parâmetros.

O valor usado na constante (neste caso a frequência a transmitir) foi de 899.75 MHz para compensar um ligeiro offset da recepção. O bloco de transmissão do ADALM-PLUTO permite o ajuste da frequência com um valor de offset em ppm na secção "Advanced" (Figura 5.6d), caso o valor de offset seja positivo. Como neste caso o valor de offset da frequência era negativo, o mesmo teve de ser subtraído ao valor da frequência central.

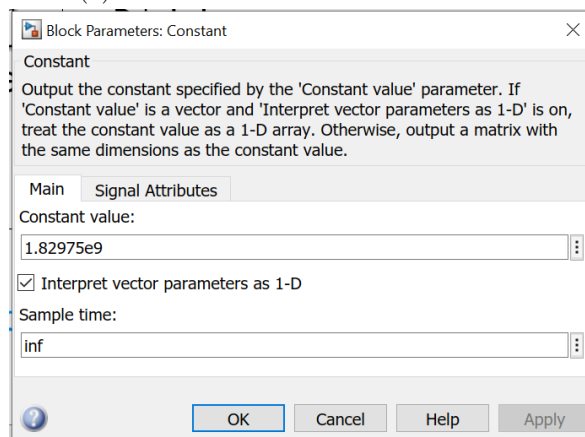
A subsecção 5.3.1 apresenta as recepções a 900 MHz observadas.

5.2.2 Transmissão e Recepção a 1.8 GHz

A Figura 5.7 demonstra o sistema de transmissão com as antenas na frequência de operação de 1.8 GHz.



(a) Sistema de transmissão a 1.8 GHz.



(b) Parâmetros da constante (frequência) utilizada no bloco de transmissão.

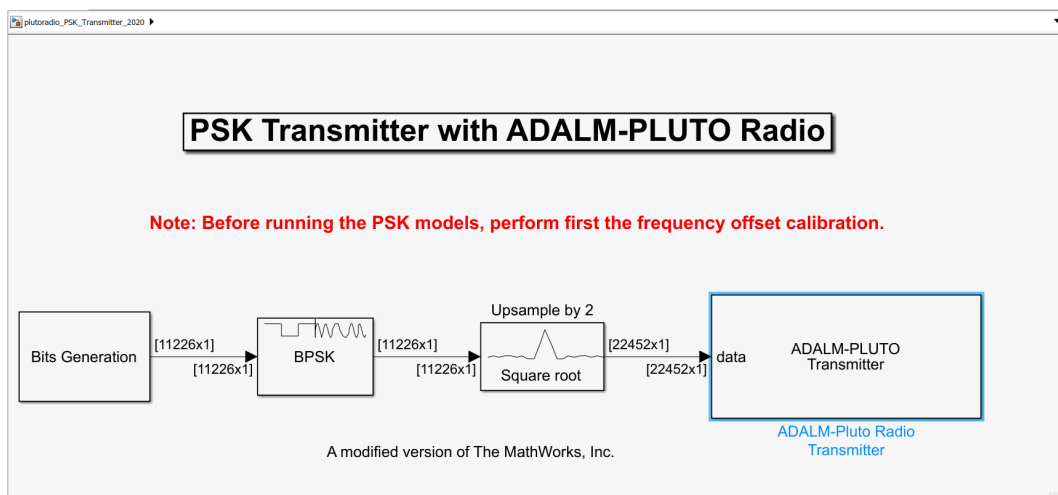
Figura 5.7: Sistema de transmissão do ADALM-Pluto a 1.8 GHz, com blocos do Simulink e os parâmetros do bloco da constante.

Os parâmetros dos blocos da transmissão a 1.8 GHz são os mesmos que no caso da transmissão a 900 MHz, com exceção da constante (frequência a transmitir). O valor usado na constante foi de 1.82975 GHz pelo mesmo motivo apresentado na subsecção anterior.

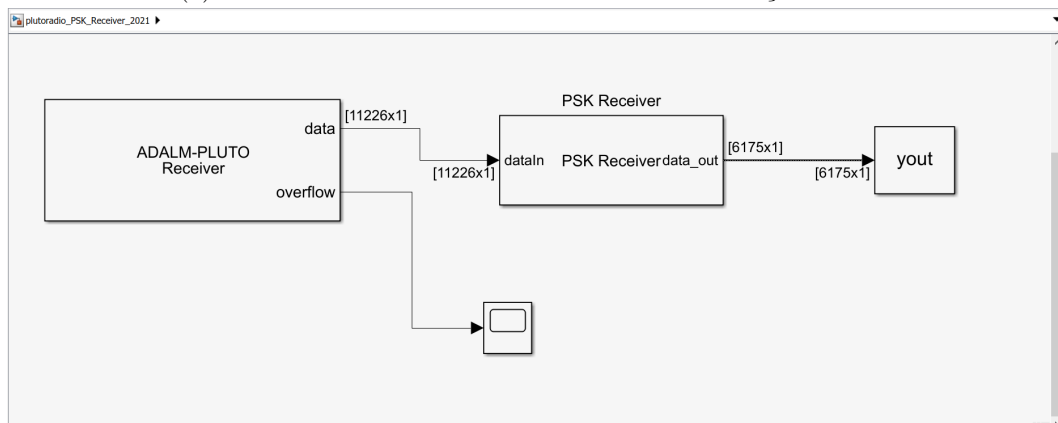
As recepções verificadas para esta frequência são apresentadas na subsecção 5.3.2.

5.2.3 Modulação BPSK a 900 MHz

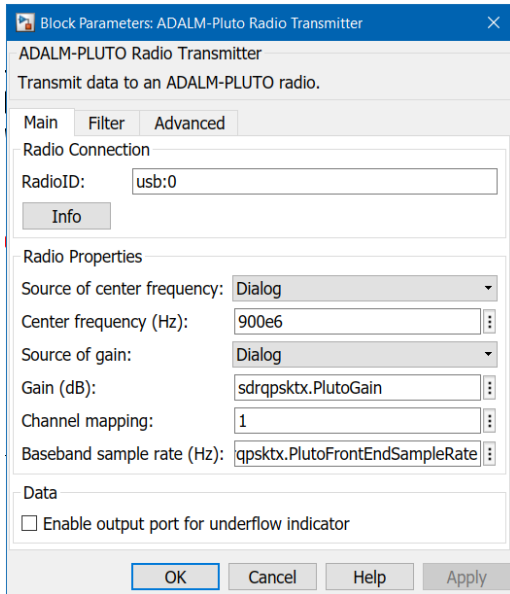
Os sistemas de transmissão-recepção com modulação BPSK em Simulink são apresentados na seguinte Figura 5.8, para a frequência de 900 MHz.



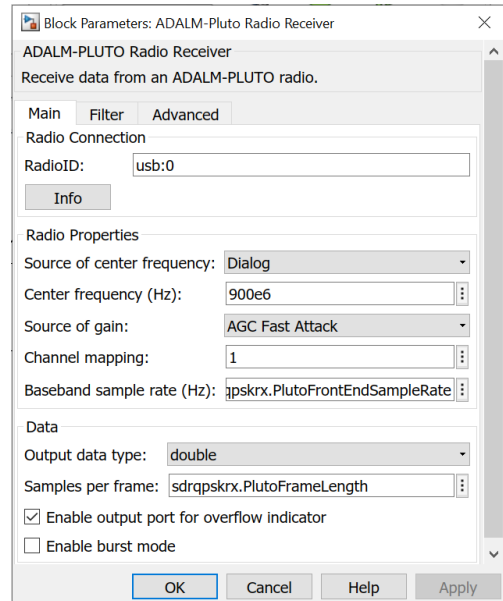
(a) Sistema de transmissão a 900 MHz em modulação BPSK.



(b) Sistema de recepção a 900 MHz em modulação BPSK.



(c) Parâmetros do bloco de transmissão.



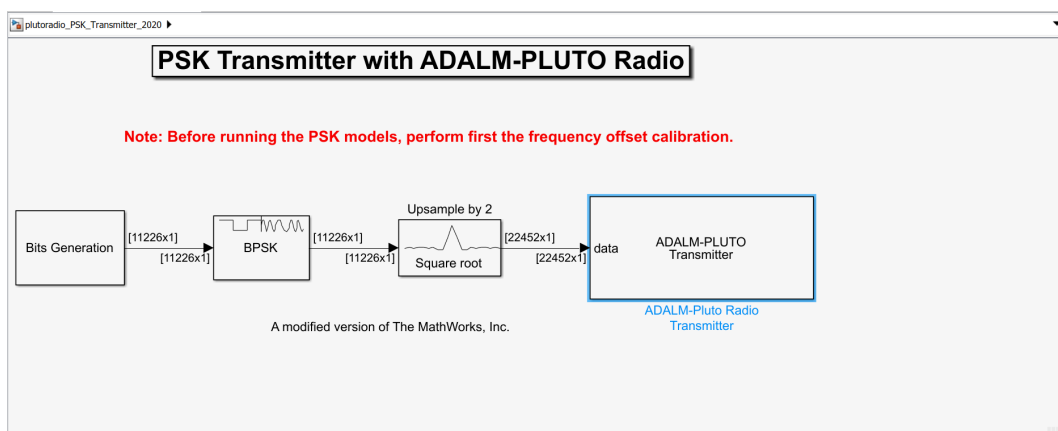
(d) Parâmetros do bloco de recepção.

Figura 5.8: Sistema de transmissão e recepção do ADALM-Pluto a 900 MHz em modulação BPSK, com blocos do Simulink e respectivos parâmetros.

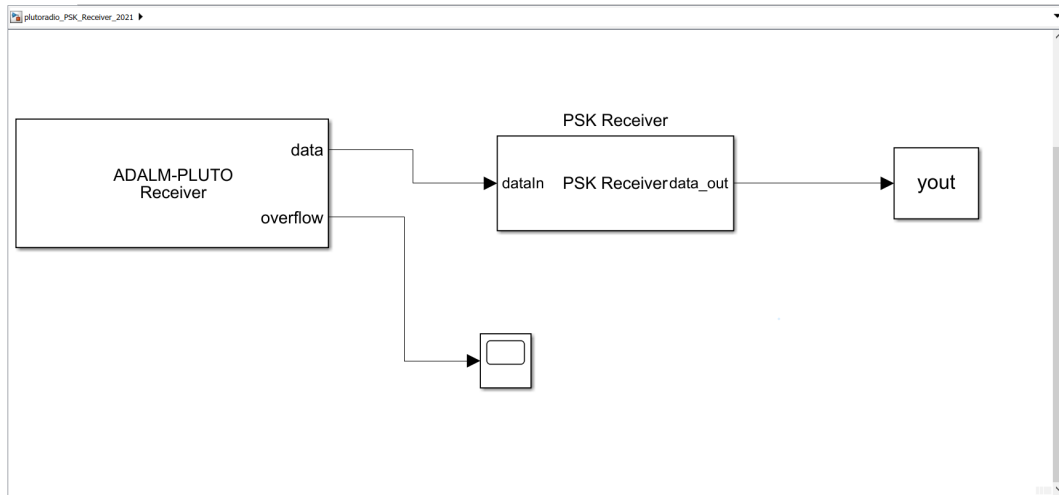
Na subsecção 5.3.3 são apresentados os diagramas de constelação em BPSK obtidos na recepção.

5.2.4 Modulação BPSK a 1.8 GHz

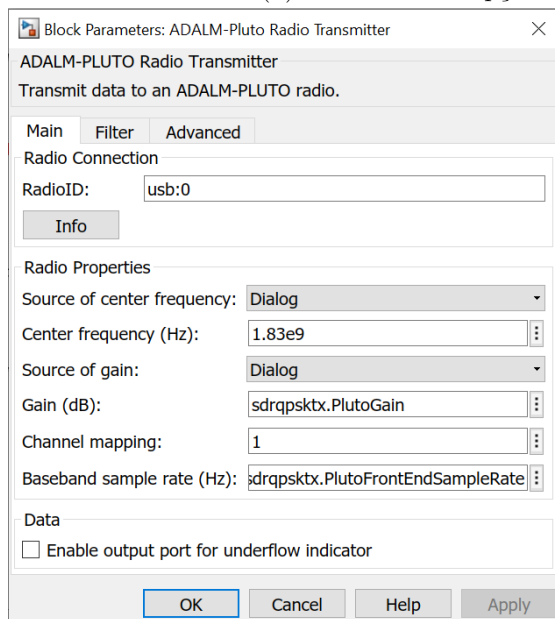
Para a modulação BPSK a 1.8 GHz, a Figura 5.9 mostra os sistemas de transmissão-recepção em Simulink.



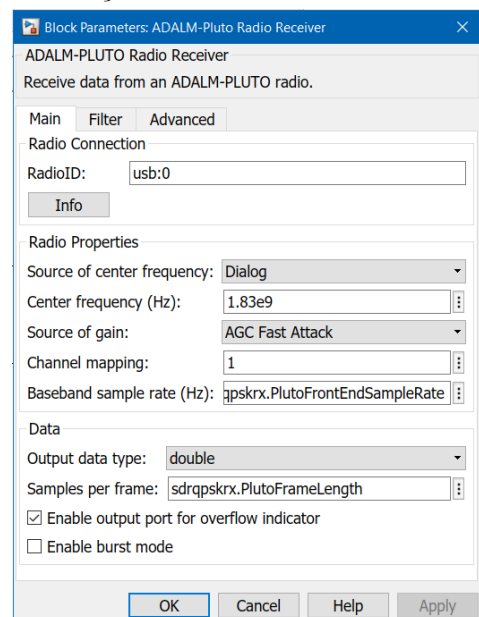
(a) Sistema de transmissão a 1.8 GHz em modulação BPSK.



(b) Sistema de recepção a 1.8 GHz em modulação BPSK.



(c) Parâmetros do bloco de transmissão.



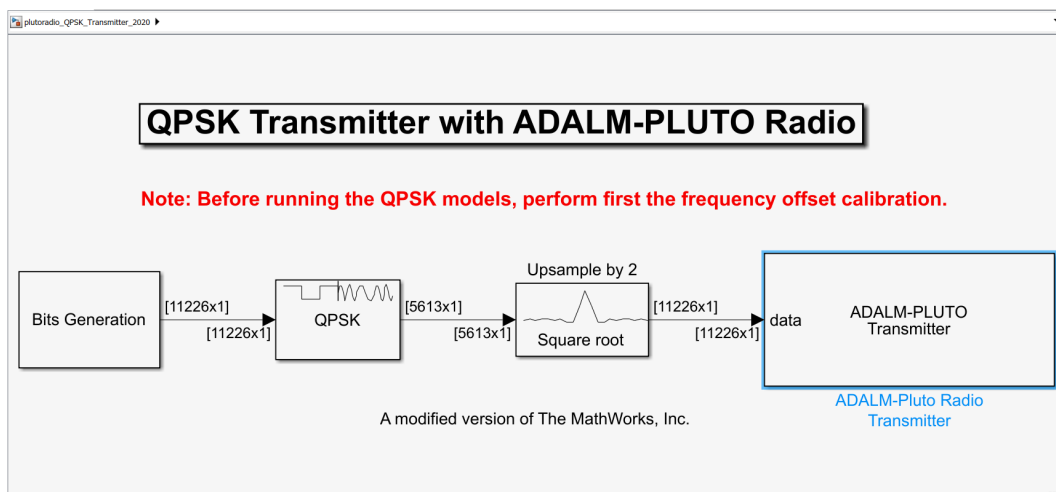
(d) Parâmetros do bloco de recepção.

Figura 5.9: Sistema de transmissão e recepção do ADALM-PLUTO a 1.8 GHz em modulação BPSK, com blocos do Simulink e respectivos parâmetros.

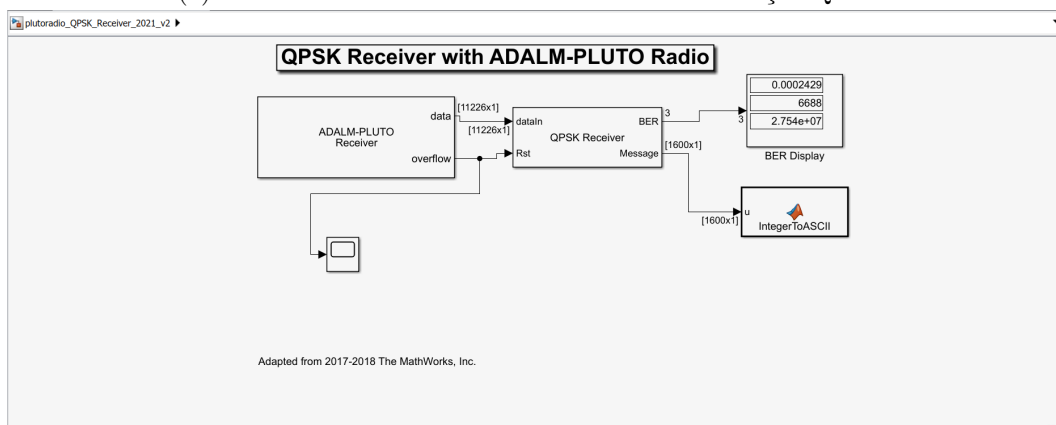
Os diagramas de constelação em BPSK obtidos a 1.8 GHz são demonstrados na subsecção 5.3.4.

5.2.5 Modulação QPSK a 900 MHz

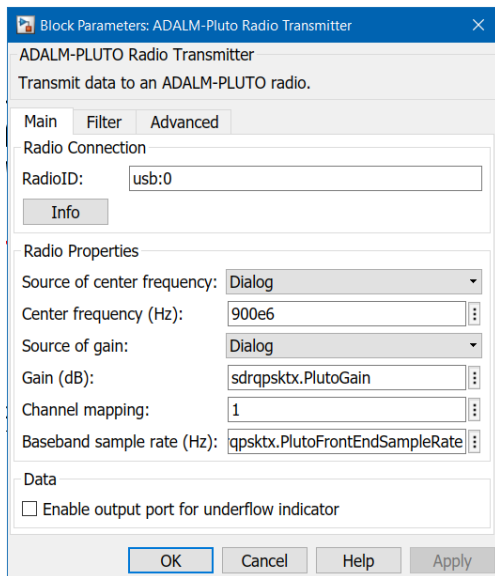
Os sistemas de transmissão-recepção em Simulink, com modulação QPSK a 900 MHz são apresentados na seguinte Figura 5.10.



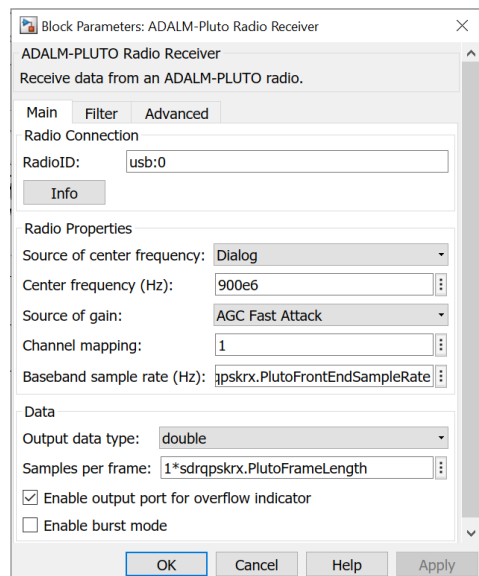
(a) Sistema de transmissão a 900 MHz em modulação QPSK.



(b) Sistema de recepção a 900 MHz em modulação QPSK.



(c) Parâmetros do bloco de transmissão.



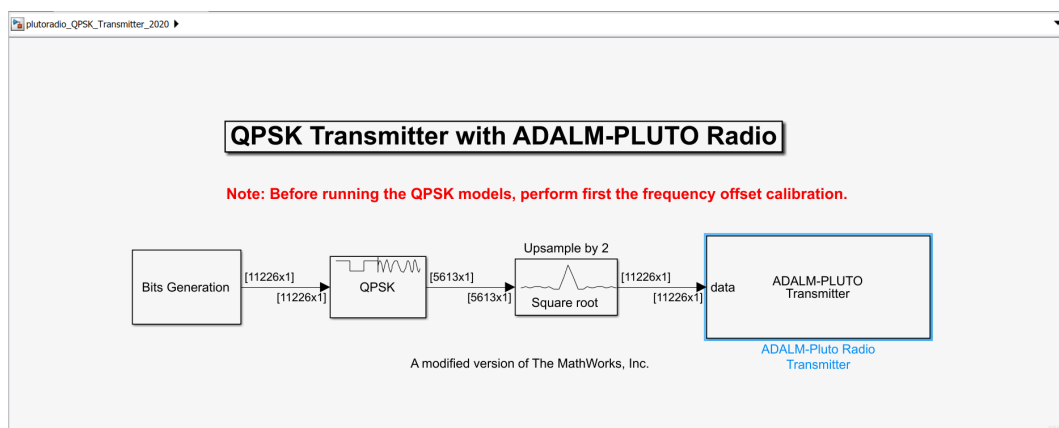
(d) Parâmetros do bloco de recepção.

Figura 5.10: Sistema de transmissão e recepção do ADALM-Pluto a 900 MHz em modulação QPSK, com blocos do Simulink e respectivos parâmetros.

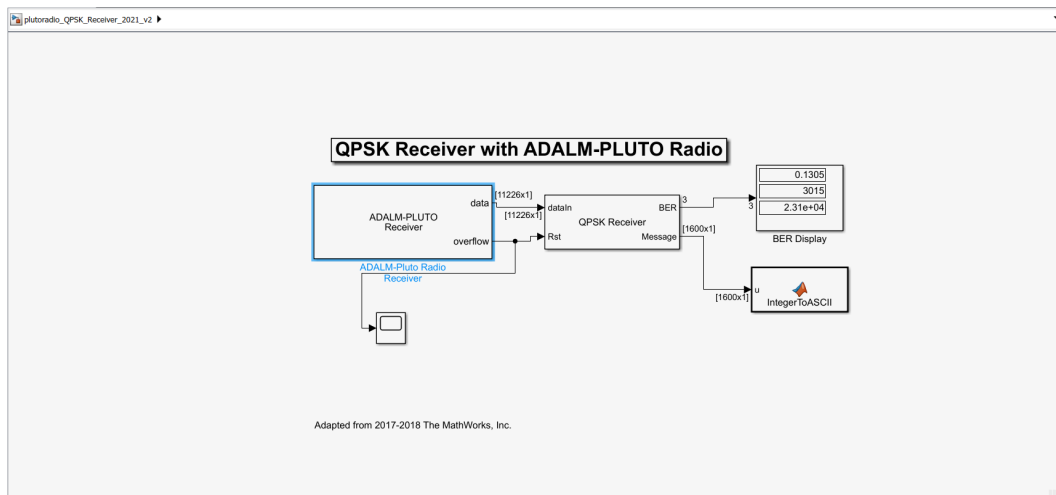
Na subsecção 5.3.5 são apresentados os diagramas de constelação em QPSK a 900 MHz.

5.2.6 Modulação QPSK a 1.8 GHz

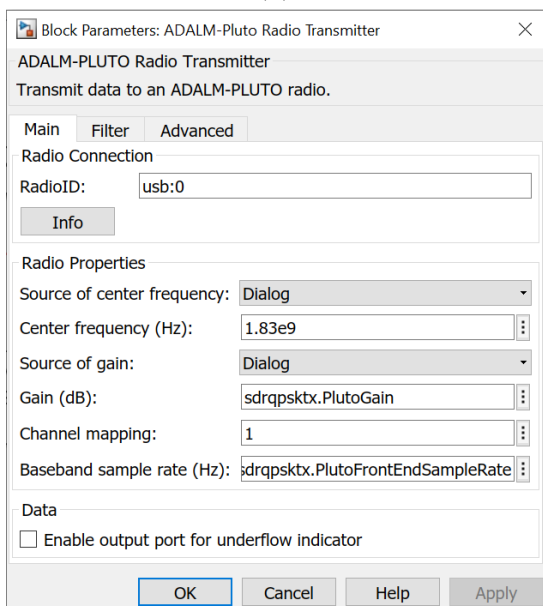
A seguinte Figura (5.11) apresenta os sistemas de transmissão-recepção com modulação QPSK a 1.8 GHz.



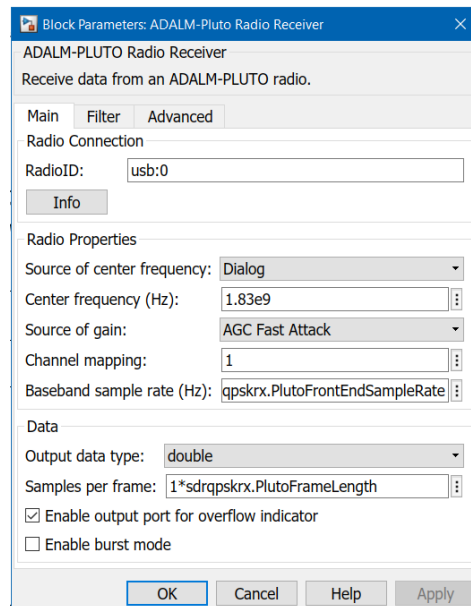
(a) Sistema de transmissão a 1.8 GHz em modulação QPSK.



(b) Sistema de recepção a 1.8 GHz em modulação QPSK.



(c) Parâmetros do bloco de transmissão.



(d) Parâmetros do bloco de recepção.

Figura 5.11: Sistema de transmissão e recepção do ADALM-Pluto a 1.8 GHz em modulação QPSK, com blocos do Simulink e respectivos parâmetros.

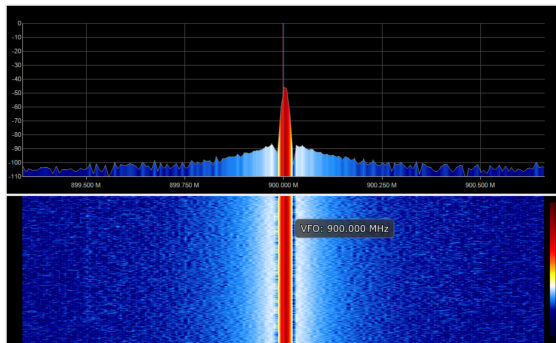
Os diagramas de constelação em QPSK obtidos a 1.8 GHz são demonstrados na subsecção 5.3.6.

5.3 Resultados

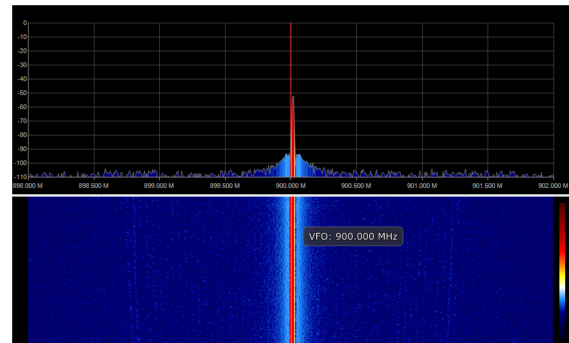
Nesta secção são apresentados os resultados obtidos, ou em forma de gráficos de potência de sinal recebido, para a transmissão-recepção a 900 MHz e 1.8 GHz, ou em forma de diagramas de constelação, para as modulações BPSK e QPSK. Na secção 5.4 é feita uma análise geral e comparação de resultados.

5.3.1 Transmissão e Recepção a 900 MHz

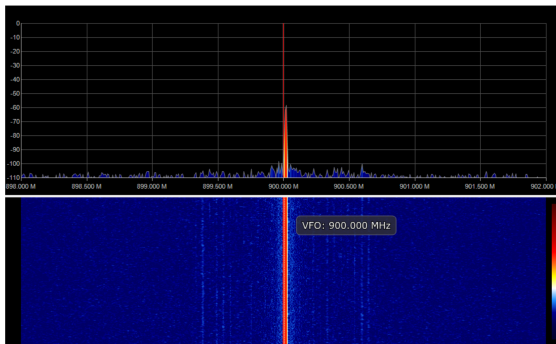
Os gráficos de potência de sinal recebido a 900 MHz, para diferentes distâncias, são apresentados na seguinte Figura (5.12).



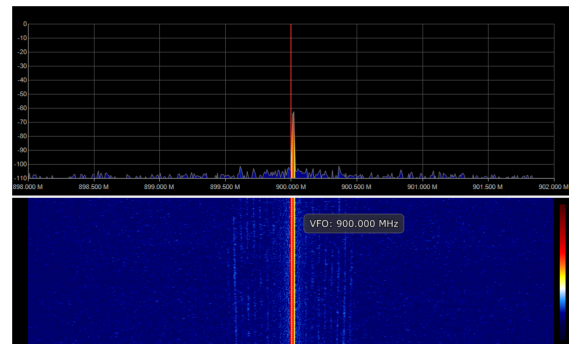
(a) 0.2 m.



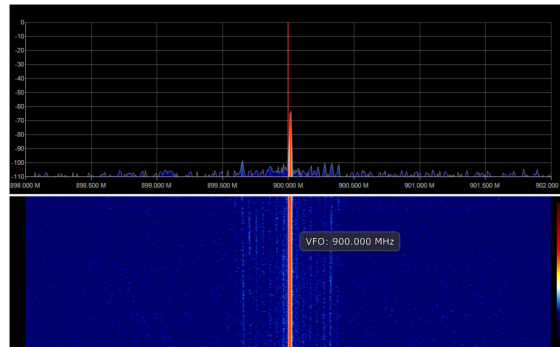
(b) 0.4 m.



(c) 0.6 m.



(d) 0.8 m.



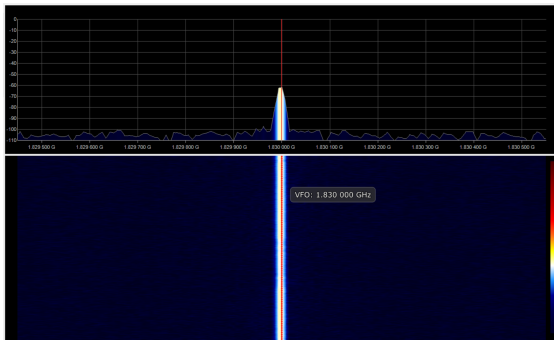
(e) 1 m.

Figura 5.12: Recepção a 900 MHz, com variação da distância entre as antenas.

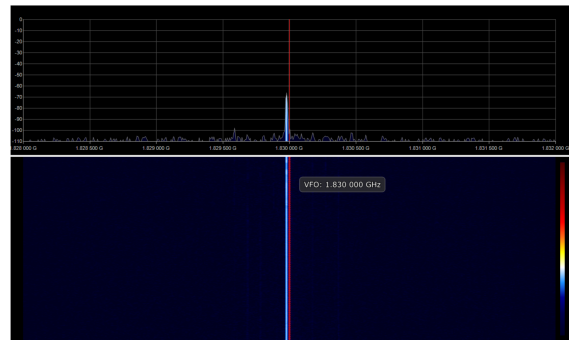
Desta figura é possível verificar que, conforme o aumento da distância entre as antenas, o valor de SNR diminui. A 20 cm o valor é de 44.8 dB e a 1 m já é de 38.8 dB. A Tabela 5.1 apresenta todos os valores de pico, ruído e SNR obtidos para esta frequência.

5.3.2 Transmissão e Recepção a 1.8 GHz

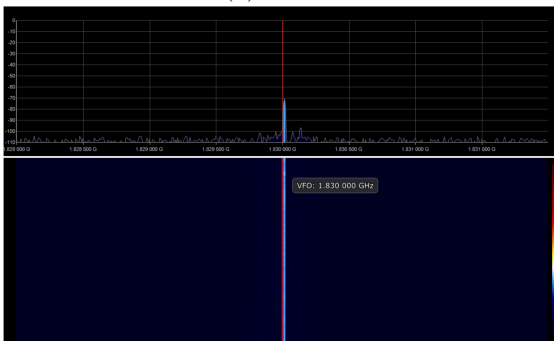
A Figura 5.13 representa os gráficos de potência de sinal recebido a 1.8 GHz.



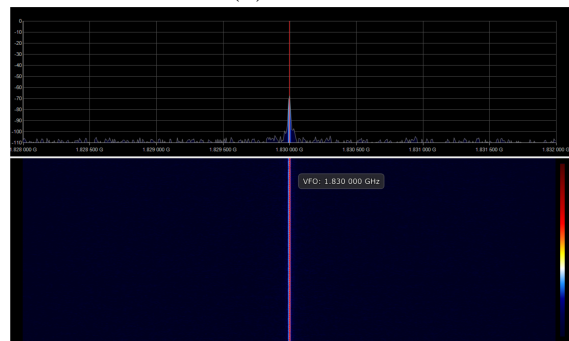
(a) 0.2 m.



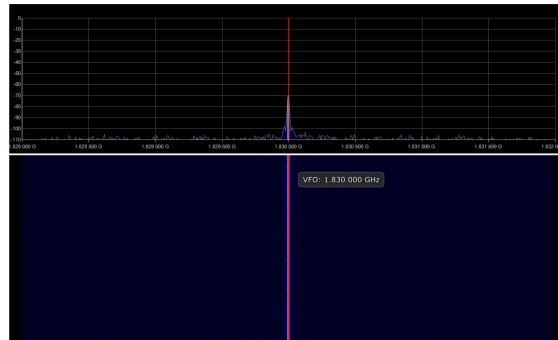
(b) 0.4 m.



(c) 0.6 m.



(d) 0.8 m.



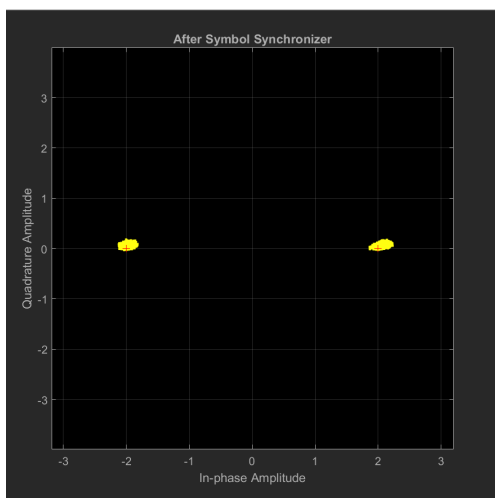
(e) 1 m.

Figura 5.13: Recepção a 1.8 GHz, com variação da distância entre as antenas.

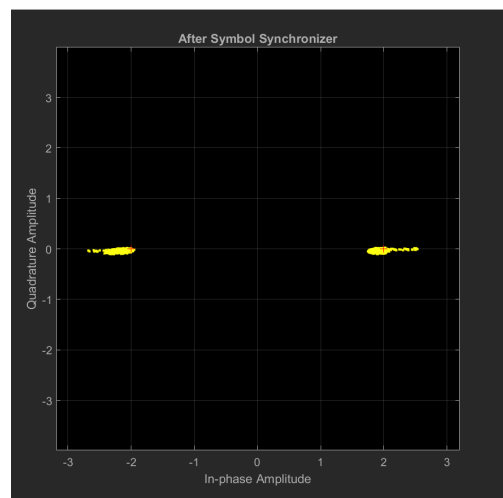
Da figura acima também é possível verificar o mesmo que se tinha observado na Figura 5.12, isto é, o valor de SNR diminui com o aumento da distância entre as antenas de transmissão e recepção. O valor de SNR é de 41.1 dB a 20 cm e é de 29.2 dB para 1 m. Todos os valores de pico, ruído e SNR obtidos a 1.8 GHz estão representados na Tabela 5.2.

5.3.3 Modulação BPSK a 900 MHz

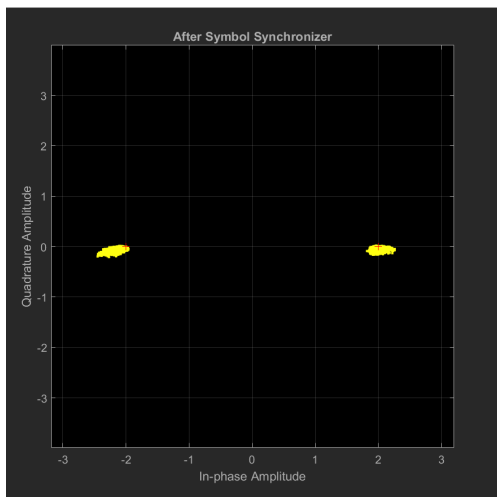
A Figura 5.14 representa os diagramas de constelação em modulação BPSK e com a frequência de operação de 900 MHz, para diferentes distâncias entre as antenas. Os diagramas foram obtidos com recurso ao software Simulink.



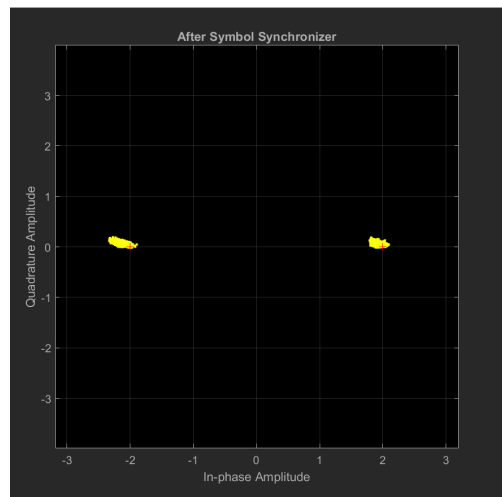
(a) 0.2 m.



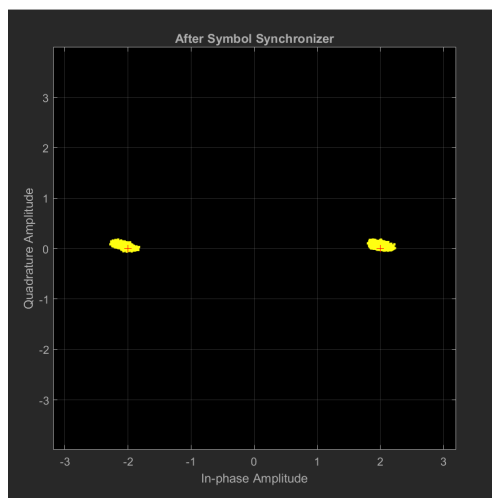
(b) 0.4 m.



(c) 0.6 m.



(d) 0.8 m.



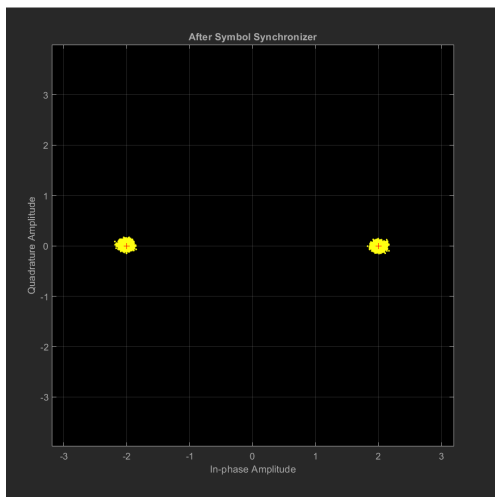
(e) 1 m.

Figura 5.14: Diagramas de constelação depois da passagem pelo sincronizador da portadora, a 900 MHz e em modulação BPSK, com variação da distância entre as antenas.

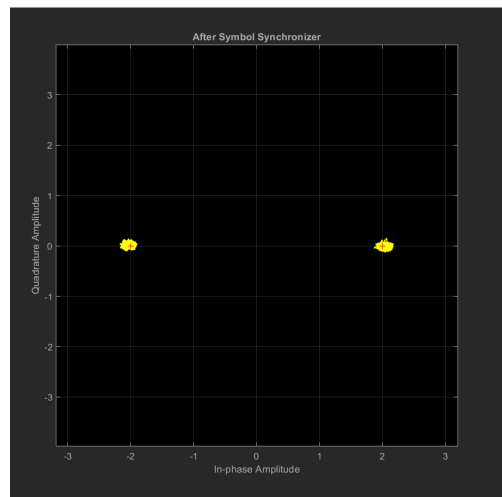
Verifica-se que o valor de Error Vector Magnitude aumenta entre 20 a 60 cm, porém diminui um pouco para a distância de 80 cm e volta a diminuir para 1 m. O melhor valor de EVM é de 4.8% a uma distância de 20 cm e o pior é de 7.4% a 60 cm. A Tabela 5.3 apresenta os resultados completos.

5.3.4 Modulação BPSK a 1.8 GHz

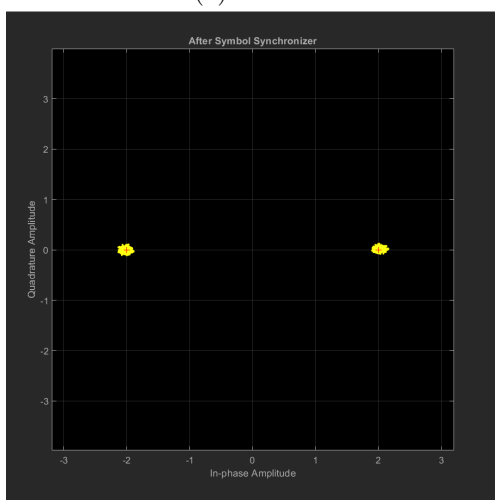
A Figura 5.15 representa a variação conforme a distância entre as antenas de transmissão e recepção dos diagramas de constelação em modulação BPSK a 1.8 GHz.



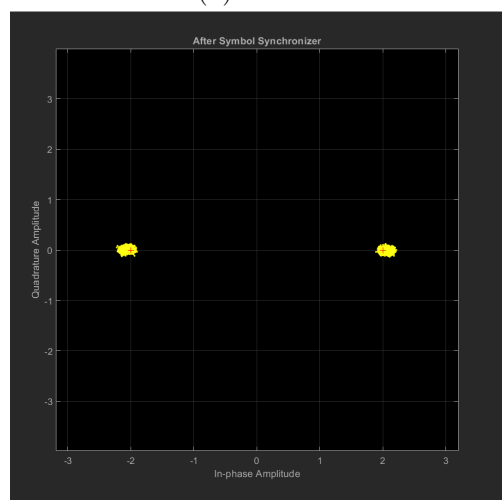
(a) 0.2 m.



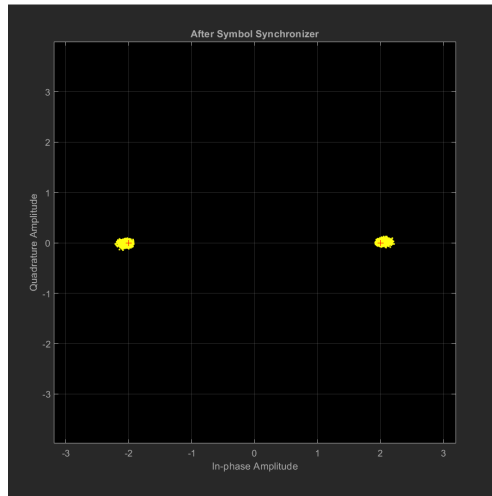
(b) 0.4 m.



(c) 0.6 m.



(d) 0.8 m.



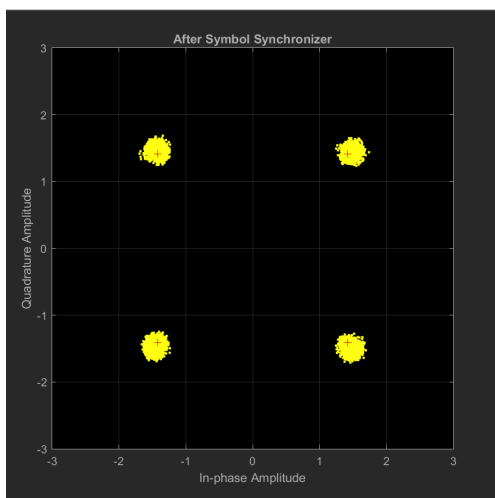
(e) 1 m.

Figura 5.15: Diagramas de constelação depois da passagem pelo sincronizador da portadora, a 1.8GHz e em modulação BPSK, com variação da distância entre as antenas.

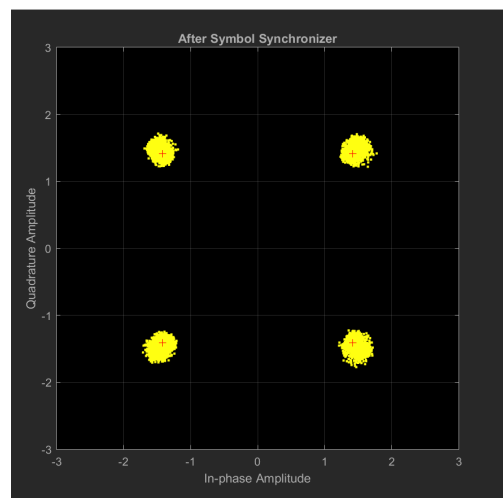
Na figura acima é verificado que o valor de EVM não varia significativamente conforme a distância, sendo o valor mais baixo de 2.9% a 60 cm e o mais elevado de 4.2% a 80 cm. Os valores de EVM também foram mais baixos nesta frequência que os equivalentes à mesma distância para a frequência de 900 MHz. Os resultados completos são representados na Tabela 5.3.

5.3.5 Modulação QPSK a 900 MHz

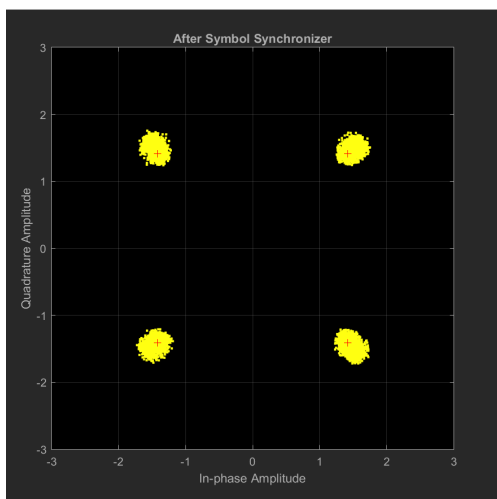
Para a modulação QPSK, os diagramas de constelação em 900 MHz, para diferentes distâncias entre as antenas de transmissão e recepção, são representados na Figura 5.16.



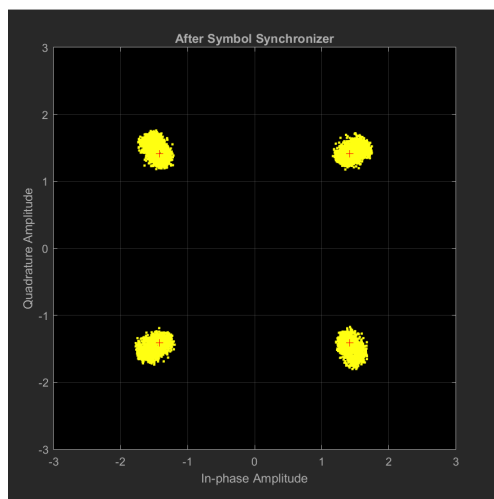
(a) 0.2 m.



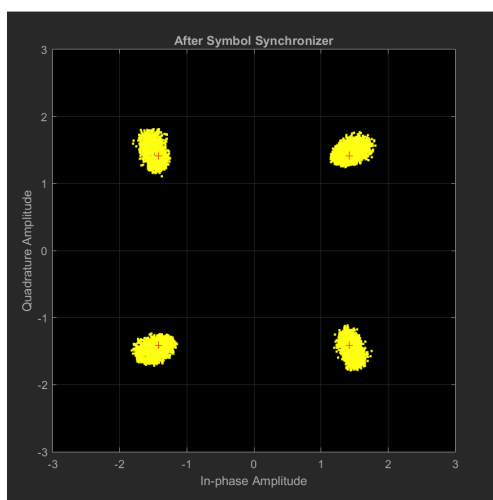
(b) 0.4 m.



(c) 0.6 m.



(d) 0.8 m.



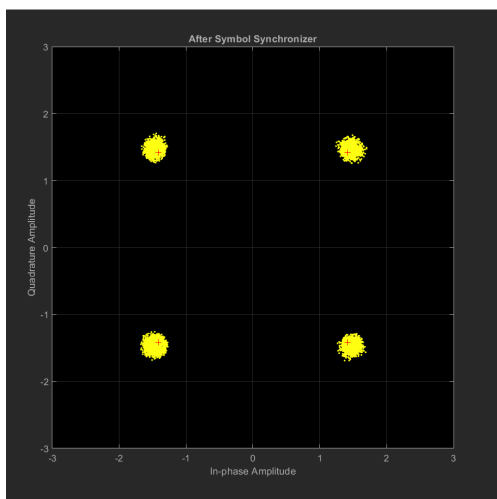
(e) 1 m.

Figura 5.16: Diagramas de constelação depois da passagem pelo sincronizador da portadora, a 900 MHz e em modulação QPSK, com variação da distância entre as antenas.

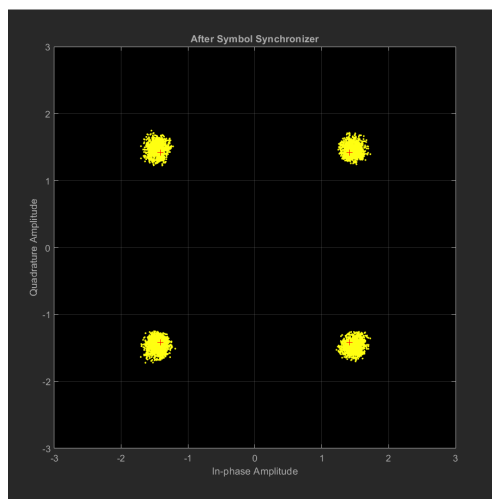
Nos diagramas acima é possível observar que, quanto maior a distância, maior é a degradação do sinal. Os valores de EVM aumentaram com o aumento da distância entre as antenas, sendo o valor mais baixo de 6.7% a uma distância de 20 cm e o valor mais elevado de 10.4% a 1 m. A Tabela 5.3 apresenta os resultados completos.

5.3.6 Modulação QPSK a 1.8 GHz

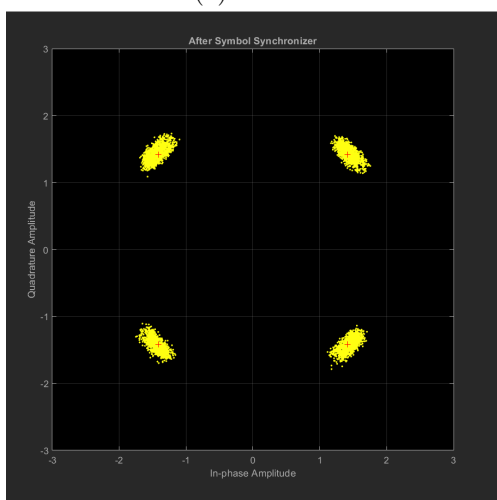
A Figura 5.17 representa a variação conforme a distância entre as antenas de transmissão e recepção dos diagramas de constelação em modulação QPSK a 1.8 GHz.



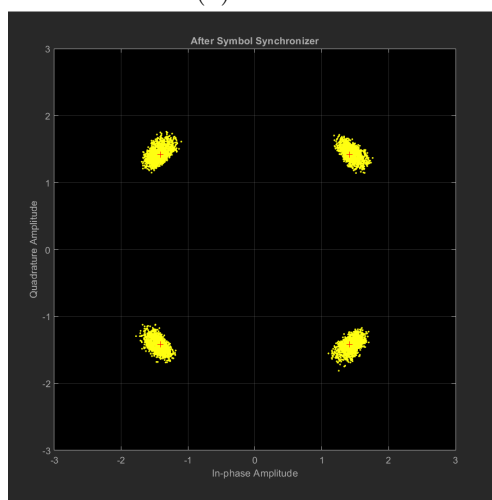
(a) 0.2 m.



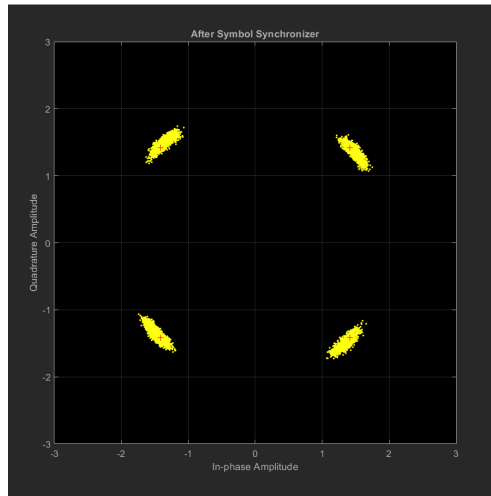
(b) 0.4 m.



(c) 0.6 m.



(d) 0.8 m.



(e) 1 m.

Figura 5.17: Diagramas de constelação depois da passagem pelo sincronizador da portadora, a 1.8 GHz e em modulação QPSK, com variação da distância entre as antenas.

A partir dos diagramas acima é possível concluir o mesmo que já se tinha verificado anteriormente na modulação QPSK a 900 MHz, a degradação dos sinais da constelação aumenta com o aumento da distância entre as antenas. Os valores de EVM aumentaram com o aumento da distância entre as antenas, sendo o valor mais baixo de 6.4% a uma distância de 20 cm e o valor mais elevado de 8.2% a 1 m. Tal como o que já tinha sido verificado na modulação em BPSK, em QPSK os valores de EVM a 1.8 GHz também foram inferiores aos equivalentes à mesma distância para a frequência de 900 MHz. Os valores de EVM são apresentados por completo na Tabela 5.3.

5.4 Análise de Resultados

As tabelas 5.1 e 5.2 mostram a comparação dos valores de pico (em dBFS), ruído (em dBFS) e SNR (em dB), cosoante a distância entre as antenas de transmissão e recepção. A (5.1) é referente à frequência de 900 MHz e (5.2) é referente à de 1.8 GHz.

	900 MHz		
	Peak	Floor	SNR
20 cm	-45.5 dBFS	-90.3 dBFS	44.8 dB
40 cm	-52.0 dBFS	-94.6 dBFS	42.6 dB
60 cm	-58.6 dBFS	-98.8 dBFS	40.2 dB
80 cm	-62.3 dBFS	-102.0 dBFS	39.7 dB
1 m	-64.9 dBFS	-103.7 dBFS	38.8 dB

Tabela 5.1: Valores de pico, ruído e SNR obtidos experimentalmente, para a recepção da frequência de operação de 900 MHz, e comparação destes valores para diferentes distâncias entre as antenas.

1.8 GHz			
	Peak	Floor	SNR
20 cm	-61.6 dBFS	-102.6 dBFS	41.1 dB
40 cm	-68.7 dBFS	-104.6 dBFS	35.9 dB
60 cm	-70.4 dBFS	-102.4 dBFS	32.0 dB
80 cm	-71.2 dBFS	-101.6 dBFS	30.4 dB
1 m	-71.9 dBFS	-100.8 dBFS	29.2 dB

Tabela 5.2: Valores de pico, ruído e SNR obtidos experimentalmente, para a recepção da frequência de operação de 1.8 GHz, e comparação destes valores para diferentes distâncias entre as antenas.

O facto de os valores de SNR a 900 MHz serem superiores aos valores a 1.8 GHz em distâncias equivalentes era expectável, independentemente da antena estar mais bem adaptada a 1.8 GHz (conforme visualizado na Figura 4.6). Estes valores obtidos experimentalmente são o resultado do que se é obtido pela fórmula de Friis, que nos relaciona a potência transmitida entre uma antena e outra, em condições ideais. A fórmula é dada por:

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (5.1)$$

Considerando então uma distância (R) entre as antenas de 20 cm, os valores obtidos são os seguintes:

- 900 MHz: $\frac{P_t}{P_r} = 0.0176$
- 1800 MHz: $\frac{P_t}{P_r} = 0.0044$

Assim é possível justificar de forma teórica a melhor relação de potência aos 900 MHz, conforme observado nas tabelas acima.

A Tabela 5.3 mostra a comparação dos valores de Error Vector Magnitude (EVM) em RMS, para a modulação BPSK e QPSK para as frequências de operação de 900 MHz e 1.8 GHz, e com a variação da distância entre as antenas de transmissão e recepção.

EVM				
	BPSK		QPSK	
	900 MHz	1.8 GHz	900 MHz	1.8 GHz
20 cm	4.8%	4.1%	6.7%	6.4%
40 cm	6.9%	3.2%	7.7%	7.0%
60 cm	7.4%	2.9%	8.1%	7.3%
80 cm	6.4%	4.2%	9.3%	7.5%
1 m	5.4%	4.1%	10.4%	8.2%

Tabela 5.3: Valores de EVM obtidos experimentalmente, para os formatos de modulação BPSK e QPSK, com frequência de operação de 900 MHz e 1.8 GHz, e comparação dos mesmos para diferentes distâncias entre as antenas.

A primeira observação é que se pode considerar no geral os valores EVM como sendo elevados, o que pode ser justificado pelo facto do ambiente onde as medições foram realizadas não ser um ambiente ideal (controlado), isto é, devido à existência de interferências multi-percurso (multi-path), quer por reflexão em estruturas existentes à volta daquele espaço, quer de outros dispositivos (outras tags) que operem na mesma banda de frequência, visto que 1.8 GHz é uma frequência bastante utilizada em comunicações móveis (GSM). Um ambiente ideal teria sido uma câmara anecóica, embora temos que considerar que a finalidade destas medições seja a aplicação em sistemas com soluções RFID e hRFID, que serão sempre utilizados em ambientes reais e não controlados.

Também é possível de se verificar que, usando modulação BPSK ou QPSK, as medições a 1.8 GHz apresentam melhores valores de EVM do que as medições a 900 MHz, o que pode ser justificado pela melhor adaptação a 1.8 GHz observada no Capítulo 4.

Outra observação é que, principalmente na modulação QPSK, o sinal recebido nas constelações degradava-se mais conforme a distância entre as antenas aumentava, o que já seria expectável.

Capítulo 6

Conclusão e Trabalho Futuro

Neste último capítulo são apresentadas as conclusões e um resumo do que foi efectuado, assim como são apresentados os possíveis próximos passos de trabalho futuro.

6.1 Conclusão

Actualmente, a tecnologia RFID gera bastante interesse à sua volta, uma vez que é uma solução barata e flexível para fins de identificação, monitorização e/ ou localização. Alguns exemplos de aplicação desta tecnologia são o armazenamento, gestão e identificação de mercadoria, aplicação em cartões de acesso a locais ou transportes, em pagamentos electrónicos, identificação de animais ou aplicação na área de saúde (como por exemplo no controlo de temperatura), entre outros.

O surgimento de soluções de interrogadores de hRFID e soluções baseadas em SDR surgiram como uma alternativa aos sistemas com soluções RFID convencionais de frequência única, pelo facto que os sistemas RFID apresentarem algumas desvantagens como o auto-bloqueio e a interferência multi-percurso (self-jamming e multi-path).

A tecnologia SDR, tal como a RFID, também é flexível e versátil, e tem a grande vantagem que permite ajustes em parâmetros que são úteis em aplicações RFID, tais como a frequência de operação, a taxa de amostragem, a largura de banda, o formato de modulação ou o protocolo de comunicação. Após uma análise aos dispositivos SDR disponíveis para utilização e aos softwares existentes no mercado para tais dispositivos, a escolha recaiu para os ADALM-PLUTO e para o MATLAB/ Simulink.

Foram desenvolvidas duas antenas equivalentes que operam em duas frequências diferentes, a 900 MHz e a 1.8 GHz, uma vez que estas frequências são bastante utilizadas, respectivamente, em comunicações RFID e GSM.

Com as antenas desenvolvidas, foram efectuadas as medições na câmara anecóica para a obtenção dos parâmetros S. Enquanto que os valores teóricos eram de um coeficiente de reflexão de -11.0 dB a 900 MHz, e de -28.9 dB a 1.8 GHz, na prática os valores foram de um coeficiente de -8.6 dB a 921 MHz e de -17.5 dB a 1.83 MHz. Aqui concluiu-se que as antenas estavam mais bem adaptadas a 1.8 GHz do que a 900 MHz, o que já era esperado pelos diagramas de radiação simulados, e que o desvio significativo entre o valor teórico e o prático a 1.8 GHz pode ser justificado devido a um erro de calibração da broca usada para o recorte da placa.

Foi implementado e testado um sistema de transmissão e recepção baseado em SDR que opera a 900 MHz e 1.8 GHz, e que funciona no formato de modulação BPSK e QPSK.

Na transmissão e recepção em frequência central de 900 MHz e 1.8 GHz, verificou-se que variação da distância entre as antenas transmissora e receptora tem um impacto no valor do sinal recebido, com a diferença de SNR entre a distância mais curta e a mais longa ser de 6 dB para 900 MHz e de 11.9 dB a 1.8 GHz. O melhor valor de SNR foi de 44.8 dB para a transmissão-recepção a 900 MHz e com uma distância de 20 cm, e o pior valor ser de 29.2 dB para a transmissão-recepção a 1.8 GHz e com uma distância de 1 m. Os valores de SNR serem superiores a uma frequência de 900 MHz do que em comparação com a 1.8 GHz é justificado pela lei de Friis.

Destas medições foi também possível concluir que a aplicação de sistemas RFID num contexto de ambiente não controlado, ou seja, um ambiente que é o mais próximo de uma utilidade prática, é mais eficiente e menos propício a erros para uma frequência de 1.8 GHz, uma vez que foi observado um EVM razoavelmente mais baixo do que para as medições com a frequência de operação a 900 MHz, para as mesmas distâncias, o que nos permite obter uma melhor recepção e processamento do nosso sinal.

A observação do sinal em modulação QPSK, após o processo de sincronização de símbolo, isto é, ao recuperar a fase do sinal sincronizado que depois é apresentado à saída no instante óptimo de amostragem onde podemos ver que a fase e a quadratura são coincidentes com a informação transmitida, com isto, pode-se realizar um tratamento da informação de forma que seja possível ser usada em aplicações de hRFID baseadas em SDR. Com estas observações, seria possível a existência de uma possível "troca" de informação entre uma antena emissora e um dispositivo RFID, como por exemplo uma tag chipless.

Os valores EVM obtidos podem ser considerados como sendo elevados, o que pode ser justificado pelo facto do ambiente onde as medições foram realizadas não ser um ambiente ideal, quer pela estrutura à volta causar reflexões, quer com a possível existência de interferências multi-path de outros dispositivos que se encontrem naquele local, isto é, a interferência de outras tags que operem na mesma banda de frequência.

Outra conclusão tirada é que, na modulação BPSK e principalmente na modulação QPSK, a degradação do sinal recebido representado nos diagramas de constelação aumenta com o afastamento entre as antenas de transmissão e recepção, isto é, com o aumento da distância. O valor de EVM mais baixo foi de 2.9% para a modulação QPSK a 1.8 GHz e o mais elevado foi de 10.4% para a modulação em QPSK a 900 MHz.

Após estas observações é possível afirmar que o conceito testado num sistema baseado em SDR é aplicável numa futura solução baseada em hRFID.

6.2 Trabalho Futuro

Uma sugestão futura, ainda baseada em sistemas SDR, seria de implementar e testar o sistema com outros formatos de modulação como, por exemplo, a modulação QAM. Outro aspecto a ter em conta seria, tendo em consideração os valores teóricos obtidos para os cálculos de far field, a execução de medições deste sistema para distâncias superiores a 1 m. Também seria interessante realizar as medições num ambiente mais controlado, para possibilitar a comparação entre resultados num ambiente controlado e num não controlado, para a verificação dos efeitos não-lineares como por exemplo as interferências multi-path. Contudo, tal como já referido anteriormente, a aplicação final de uma solução baseada neste sistema seria sempre em ambientes não ideais e com interferências.

Continuando com o desenvolvimento de uma solução baseada em sistemas SDR, outro aspecto a ter em conta seria a passagem de um sistema de comunicação entre dispositivos de forma unilateral para um de transmissão bilateral, isto é, um só SDR acoplado com uma antena transmissora e outra receptora, e com a utilização de um só PC. Neste caso teria-se de se utilizar duas instâncias do software MATLAB, uma para a transmissão e outra para a recepção ou em alternativa considerar a utilização de um outro software como, por exemplo, o GNU Radio.

Numa implementação futura, o ideal seria o desenvolvimento de uma solução de um sistema RFID harmónico que recebesse a 900 MHz e transmitisse a 1.8 GHz.

Bibliografia

- [1] Guillermo Alvarez-Narciandi et al. “A UHF-RFID Gate Control System Based on a Recurrent Neural Network”. Em: *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 18.11 (2019), pp. 2330–2334. DOI: 10.1109/LAWP.2019.2929416.
- [2] Klaus Finkenzeller. *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication*. English. Hardcover. Wiley, ago. de 2010, p. 478. ISBN: 978-0470695067.
- [3] U. Kaiser e W. Steinhagen. “A low-power transponder IC for high-performance identification systems”. Em: *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 30.3 (1995), pp. 306–310. DOI: 10.1109/4.364446.
- [4] Stevan Preradovic e Nemaï Chandra Karmakar. “Chipless RFID: Bar Code of the Future”. Em: *IEEE Microwave Magazine* 11.7 (2010), pp. 87–97. DOI: 10.1109/MMM.2010.938571.
- [5] Qiu Jinghui, Sun Bo e You Qidi. “Study on RFID Antenna for Railway Vehicle Identification”. Em: *2006 6th International Conference on ITS Telecommunications*. 2006, pp. 237–240. DOI: 10.1109/ITST.2006.288863.
- [6] everything RF. *More than 15 Billion RAIN RFID Tag Chips Sold in 2018*. Mar. de 2019. URL: <https://www.everythingrf.com/News/details/7797-More-than-15-Billion-RAIN-RFID-Tag-Chips-Sold-in-2018> (acedido em 20/10/2020).
- [7] Raghu Das e Peter Harrop. “RFID forecasts, players and opportunities 2009–2019”. Em: *IDTechEx report* (2009).
- [8] Deepak Kumar et al. “Harmonic RFID Communication Using Conventional UHF System”. Em: *IEEE Journal of Radio Frequency Identification* 3.4 (2019), pp. 227–235. DOI: 10.1109/JRFID.2019.2925527.
- [9] Mark Roberti. *The History of RFID Technology*. Jan. de 2005. URL: <https://www.rfidjournal.com/the-history-of-rfid-technology> (acedido em 06/10/2020).
- [10] Electronics Notes. *RFID History*. URL: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/rfid-radio-frequency-identification/development-history.php> (acedido em 06/10/2020).
- [11] João Ricardo Borges dos Santos. “Leitor RFID para a gama UHF baseado em software-defined radio”. Tese de mestrado. Universidade de Aveiro, 2014. URL: <http://hdl.handle.net/10773/14660>.
- [12] Marco Garbati et al. “Ultrawideband Chipless RFID: Reader Technology From SFCW to IR-UWB”. Em: *IEEE Microwave Magazine* 20.6 (2019), pp. 74–88. DOI: 10.1109/MMM.2019.2904408.

- [13] Etienne Perret. *Radio Frequency Identification and Sensors: From RFID to Chipless RFID (Iste)*. English. Hardcover. Wiley-ISTE, dez. de 2014, p. 360. ISBN: 978-1848217669.
- [14] Valentina Palazzi et al. “Low-Power Frequency Doubler in Cellulose-Based Materials for Harmonic RFID Applications”. Em: *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* 24.12 (2014), pp. 896–898. DOI: 10.1109/LMWC.2014.2361431.
- [15] Xiao-ping Xue et al. “RFID and ATIS Information System Based Railway Container Transportation Management”. Em: *2009 First International Conference on Information Science and Engineering*. 2009, pp. 3052–3056. DOI: 10.1109/ICISE.2009.1031.
- [16] Xiaoqiang Zhang et al. “Performance analysis of ”fast-moving” RFID tags in state-of-the-art high-speed railway systems”. Em: *2010 IEEE International Conference on RFID-Technology and Applications*. 2010, pp. 281–285. DOI: 10.1109/RFID-TA.2010.5529918.
- [17] Bong-Kwan Cho et al. “RFID system response test for position detection of 420km/h high-speed train”. Em: *2013 International Conference on ICT Convergence (ICTC)*. 2013, pp. 972–973. DOI: 10.1109/ICTC.2013.6675531.
- [18] J. Capetanakis. “Tree algorithms for packet broadcast channels”. Em: *IEEE Transactions on Information Theory* 25.5 (1979), pp. 505–515. DOI: 10.1109/TIT.1979.1056093.
- [19] Farshid Sahba e Ramin Sahba. “Prevention of Metro Rail Accidents and Incidents in Stations Using RFID Technology”. Em: *2018 World Automation Congress (WAC)*. 2018, pp. 1–5. DOI: 10.23919/WAC.2018.8430408.
- [20] LIU Liu et al. “Survey of wireless channel measurement and characterization for high-speed railway scenarios”. Em: *Journal on Communications* 35.1 (2014), p. 115.
- [21] Yan Zhang et al. “Measurement-based delay and Doppler characterizations for high-speed railway hilly scenario”. Em: *International Journal of Antennas and Propagation* 2014 (2014).
- [22] Minoru Tanaka et al. “Development of condition monitoring system for railway facilities using opportunistic communication”. Em: *2018 IEEE International Conference on RFID Technology Application (RFID-TA)*. 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/RFID-TA.2018.8552796.
- [23] Atsushi Yokoyama. “Innovation in railways: Platform for maintenance innovation using ICT”. Em: *JR East Technical Review* 29 (2014).
- [24] Kazushi Matsuura. “Prospects of “Smart Maintenance” Utilizing ICT”. Em: *JR East Technical Review* 34 (2016).
- [25] Francesca Camera et al. “Monitoring of temperature stress during firefighters training by means of RFID epidermal sensors”. Em: *2019 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*. 2019, pp. 499–504. DOI: 10.1109/RFID-TA.2019.8892269.
- [26] Tagleorge Marques Silveira, Pedro Pinho e Nuno Borges Carvalho. “RFID Tattoo for COVID-19 Temperature Measuring”. Em: *2021 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*. 2021, pp. 98–100. DOI: 10.1109/RWS50353.2021.9360325.
- [27] Vinícius Oliveira et al. “Automation System for Six-minute Walk Test Using RFID Technology”. Em: *2020 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*. 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ISNCC49221.2020.9297215.

- [28] Hospital da Luz. *Prova de marcha de 6 minutos*. Mar. de 2019. URL: <https://www.hospitaldaluz.pt/pt/guia-de-saude/dicionario-de-saude/P/180/prova-de-marcha-de-6-minutos> (acedido em 23/04/2021).
- [29] Vinicius Oliveira et al. “Design, simulation and fabrication of low cost UHF RFID reader antenna for hospital applications”. Em: *2018 11th German Microwave Conference (GeMiC)*. 2018, pp. 36–39. DOI: 10.23919/GEMIC.2018.8335022.
- [30] Travis F. Collins et al. *Software-defined radio for engineers*. Artech House mobile communications series. Norwood, MA: Artech House, 2018. ISBN: 9781630814571.
- [31] Wireless Innovation Forum. *What is Software Defined Radio?* URL: https://www.wirelessinnovation.org/Introduction_to_SDR (acedido em 12/10/2021).
- [32] Di Pu e Alexander M. Wyglinski. *Digital communication systems engineering with software-defined radio*. Mobile communications series. OCLC: ocn811964794. Boston: Artech House, 2013. ISBN: 9781608075256.
- [33] ITU-R. *Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS)*. Rel. téc. Set. de 2009. URL: <https://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2152-2009> (acedido em 19/10/2021).
- [34] Jeffrey H. Reed. *Software Radio: A Modern Approach to Radio Engineering*. English. Paperback. Prentice Hall, mai. de 2002, p. 588. ISBN: 978-0130811585.
- [35] Bruno Ramos Maximino. “Bancada laboratorial para investigação e ensino de sistemas de comunicações digitais definidos por software”. Tese de mestrado. Universidade de Aveiro, 2018. URL: <http://hdl.handle.net/10773/28304>.
- [36] LUARadio. *New to SDR?* URL: <https://luaradio.io/new-to-sdr.html> (acedido em 29/07/2021).
- [37] Analog Devices. *ADALM-PLUTO*. URL: <https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/adalm-pluto.html#eb-overview> (acedido em 16/09/2021).
- [38] RTL-SDR.com. *Buy RTL-SDR Dongles (RTL2832U)*. URL: <https://www.rtl-sdr.com/buy-rtl-sdr-dvb-t-dongles/> (acedido em 25/10/2021).
- [39] Ettus Research. *Enclosure Kit for USRP B200/B210*. URL: <https://www.ettus.com/all-products/usrp-b200-enclosure/> (acedido em 25/10/2021).
- [40] Ettus Research. *USRP-N310*. URL: <https://www.ettus.com/all-products/usrp-n310/> (acedido em 25/10/2021).
- [41] Analog Devices. *ADALM-PLUTO SDR Active Learning Module*. URL: <https://www.analog.com/media/en/news-marketing-collateral/product-highlight/ADALM-PLUTO-Product-Highlight.pdf> (acedido em 06/09/2021).
- [42] RTL-SDR.com. *About RTL-SDR*. URL: <https://www.rtl-sdr.com/about-rtl-sdr/> (acedido em 20/10/2021).
- [43] Ettus Research. *USRP B200/B210 Bus Series*. URL: https://www.ettus.com/wp-content/uploads/2019/01/b200-b210_spec_sheet.pdf (acedido em 25/10/2021).
- [44] Ettus Research. *USRP N310 Simplifying SDR Deployment*. URL: https://www.ettus.com/wp-content/uploads/2019/01/USRP_N310_Datasheet_v3.pdf (acedido em 25/10/2021).

- [45] Paulo Monteiro. “SDR-Part II: BPSK and QPSK Receiver based on SDR”. Pratical Assignment N^o2 da Unidade Curricular de Sistemas de Informação (SI), DETI, Universidade de Aveiro. 2020.
- [46] M. Hennerich R. Getz. *Stupid Pluto Tricks with the ADALM-PLUTO*. 2018. URL: <https://archive.fosdem.org/2018/schedule/event/plutosdr/> (acedido em 18/10/2021).
- [47] MathWorks. *MATLAB*. URL: https://www.mathworks.com/products/matlab.html?s_tid=hp_products_matlab (acedido em 27/10/2021).
- [48] GNU Radio Project. *About GNU Radio*. URL: <https://www.gnuradio.org/about/> (acedido em 27/10/2021).
- [49] National Instruments. *What Is LabVIEW?* URL: <https://www.ni.com/pt-pt/shop/labview.html> (acedido em 27/10/2021).
- [50] Airspy. *SDR Software Download*. URL: <https://airspy.com/download/> (acedido em 27/10/2021).
- [51] Nuno Borges Carvalho. “8^a Aula - Antenas”. Slides da Unidade Curricular de Antenas e Guias de Onda (AGO), DETI, Universidade de Aveiro. 2018.
- [52] Nuno Borges Carvalho. “Definições e Conceitos Fundamentais”. Apontamentos da Unidade Curricular de Antenas e Guias de Onda (AGO), DETI, Universidade de Aveiro. 2018.
- [53] Constantine Balanis. *Antenna theory : analysis and design*. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2016. ISBN: 1118642066.
- [54] Tayyaba Khan et al. “A Low-Cost CPW-Fed Multiband Frequency Reconfigurable Antenna for Wireless Applications”. Em: *Electronics* 08 (ago. de 2019), p. 900.
- [55] MathWorks. *Spectral Analysis with ADALM-PLUTO Radio*. URL: <https://www.mathworks.com/help/supportpkg/plutoradio/ug/spectral-analysis-with-adalm-pluto-radio.html> (acedido em 20/09/2021).
- [56] MathWorks. *QPSK Transmitter with ADALM-PLUTO Radio*. URL: <https://www.mathworks.com/help/supportpkg/plutoradio/ug/qpsk-transmitter-with-adalm-pluto-radio-1.html> (acedido em 20/09/2021).
- [57] MathWorks. *QPSK Receiver with ADALM-PLUTO Radio*. URL: <https://www.mathworks.com/help/supportpkg/plutoradio/ug/qpsk-receiver-with-adalm-pluto-radio-1.html> (acedido em 20/09/2021).