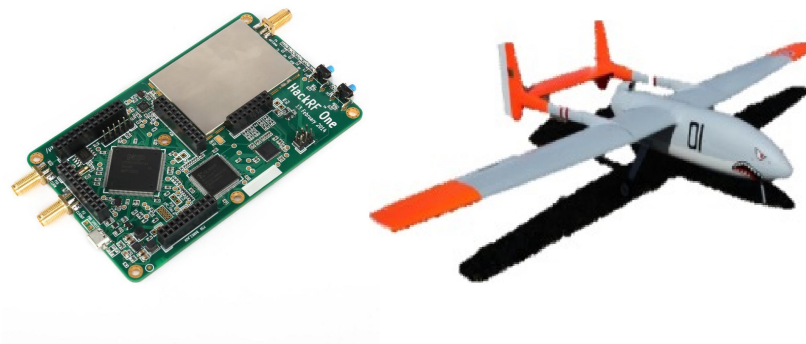




Academia da Força Aérea



Estudo, desenvolvimento e implementação de uma solução para receber e enviar sinais de voz na banda aeronáutica através de um Software Defined Radio (SDR) a bordo de uma aeronave não-tripulada

André Daniel Franco da Glória

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Ciências Militares Aeronáuticas na especialidade de Engenharia Electrotécnica

Orientador: Capitão Gonçalo Charters Santos Cruz

Co-Orientador: Capitão Tiago Miguel Monteiro de Oliveira

Júri

Presidente: Brigadeiro General Armando Carlos Marcos Correia de Barros

Orientador: Capitão Gonçalo Charters Santos Cruz

Vogal: Major Elói Teixeira Pereira

Novembro 2020

“Success is not final, failure is not fatal; it is courage to continue that counts.” Winston Churchill

Agradecimentos

Esta dissertação de mestrado não teria o mesmo valor sem a contribuição de determinadas pessoas às quais não faria justiça se não mencionasse aqui.

Um profundo agradecimento à Academia da Força Aérea (AFA) e a todos que por ela passaram nestes 6 anos. Por todos os ensinamentos, por cultivar em mim a instituição castrense e por me passar valores e ideais que prezo e guardo com muita estima.

Gostaria de enaltecer e agradecer a contribuição do Capitão Gonçalo Cruz que, na qualidade de orientador, sempre exigiu o máximo e forneceu todas as ferramentas para que este trabalho fosse bem sucedido. Expresso o meu agradecimento por toda a disponibilidade e preocupação demonstrada.

Quero agradecer ao Capitão Tiago Oliveira pelas relevantes sugestões e por todos os contributos para o êxito desta dissertação. Gostaria também de destacar o seu papel enquanto Diretor de Curso nesta última etapa no meu percurso na AFA.

Quero deixar um agradecimento ao Centro de Investigação da Academia da Força Aérea (CIAFA), na pessoa do Chefe do Departamento de Operações Major João Caetano, pela disponibilidade demonstrada na contribuição para este trabalho.

Deixo, também, um sentido agradecimento ao meu curso, os HURAKANS. Camaradas, sem vós, esta jornada não tinha tido metade da piada. Agradeço-vos por todos os momentos que partilhámos de sofrimento, de tristeza, de alegria e de felicidade. Saibam que cada um de vós me marcou e carregarei sempre o nosso *patch* com orgulho ao peito.

À minha família quero agradecer por todos os valores e ensinamentos que me passaram ao longo destes 24 anos de vida. Em especial, aos meus pais por todos os conselhos, desabafos, telefonemas,... A vossa sabedoria fez-me crescer e muito do que sou hoje devo a vocês. Ao meu irmão, por me demonstrar o significado de resiliência e ter sempre uma palavra de apoio, “que nunca por vencidos se conheçam”.

Por fim, quero reconhecer o papel de uma pessoa que me ajudou todos os dias durante o desenvolvimento deste trabalho. Matilde, a tua companhia e amor melhoraram os meus dias, especialmente os mais difíceis. Quando faltava motivação ou as coisas não corriam bem foste tu, através da tua amizade e preocupação, que me fizeste dar a volta e chegar onde estou agora, obrigado.

Resumo

Este trabalho está enquadrado na missão do Centro de Investigação da Academia da Força Aérea (CIAFA) e tem como principal objetivo desenvolver uma solução, que permita a comunicação de voz em banda aeronáutica entre os operadores do *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), outras aeronaves e *Ground Stations* (GS).

Numa fase inicial, são estudadas a transmissão e receção na banda aeronáutica e as opções de *hardware* e *software* disponíveis para a aplicação considerada. De seguida, são apresentadas as dimensões do UAV ANTEX-X02 Alfa Extended, com destaque para a zona de *payload*, seguido da análise dos seus sistemas.

O desenvolvimento do sistema foi realizado de forma modular: i) determinação dos requisitos do sistema; ii) receção do sinal analógico de voz modulado em amplitude através de um *Software Defined Radio* (SDR); iii) envio de sinais analógicos de voz modulados em amplitude através de um SDR; iv) envio e receção de sinais de voz através de uma ligação digital via *Internet Protocol* (IP). A validação da implementação é realizada de forma independente, para cada um dos módulos desenvolvidos. Finalmente, demonstra-se o funcionamento do sistema completo, recorrendo a uma implementação de *software* que articula os diferentes módulos. A solução final implementada, permite a um operador de sistemas UAV realizar comunicações de voz através do sistema instalado.

Por fim, demonstra-se o funcionamento da implementação através de um conjunto de testes elaborados com o propósito de simular a operação da aeronave. Estes testes são posteriormente analisados e são feitas recomendações para aplicações futuras.

Palavras Chave

SDR, UAV, banda aeronáutica, *GNURadio Companion*, *HackRF One*.

Abstract

This thesis is developed in the context of the Air Force Academy Research Center. The thesis' goal is to develop a solution that allows airband voice communication between the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) operators and other elements, like manned aircraft and Air Traffic control stations.

Initially, the reception and transmission within the airband were studied to identify the available solutions, considering the proposed goals. The selected UAV's dimensions are presented, with special detail for the payload capability and then its systems are described.

The development of the system was fulfilled using sequential steps: i) definition of the requirements of the system; ii) reception of a voice signal with amplitude modulation using a Software Defined Radio (SDR); iii) transmission of a voice signal with amplitude modulation using a SDR; iv) transmission and reception of voice signals over a digital link with IP connectivity. The validation of the implementation is achieved independently for each module. Finally the individual modules are integrated in a unique software tool, that also provides a graphical user interface to the UAV operator. Lastly, the system is evaluated according to a set of criteria, that were defined to emulate an architecture similar to a real operation. The results of the tests are analyzed, including recommendations for future developments.

Keywords

SDR, UAV, airband, GNURadio Companion, HackRF One.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	2
1.2	Motivação e Objectivo	3
1.3	Estrutura	4
2	Estado de Arte	5
2.1	Comunicações Aeronáuticas	6
2.1.1	Atribuição de Frequências	6
2.1.2	Enquadramento Legal	7
2.1.3	Perspectivas Futuras	8
2.2	Soluções Consideradas	9
2.3	<i>Software Defined Radios</i>	10
2.3.1	<i>Hardware</i>	11
2.3.2	<i>Software</i>	12
2.4	Fundamentos de Telecomunicações	13
3	<i>Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Considerado</i>	21
3.1	Dimensões da Aeronave	22
3.2	Sistemas	23
3.2.1	Arquitetura Geral	24
4	Sistema Proposto	27
4.1	Requisitos	28
4.1.1	Arquitetura Geral	28
4.1.2	Integração no UAV	30
4.1.3	Telecomunicações	30
4.2	Escolha do SDR	33
4.3	Validação das Implementações	34
4.3.1	Implementação para recepção <i>Amplitude Modulation (AM)</i>	34
4.3.2	Implementação para emissão AM	35

4.4	Diagrama do Sistema	37
4.5	Desenvolvimento da Interface	41
5	Avaliação	43
5.1	Configuração para Teste	44
5.2	Critérios de Avaliação	45
5.3	Resultados	47
6	Conclusão	51
6.1	Trabalho Realizado	52
6.2	Trabalho Futuro	52
A	Anexo A - <i>Datasheet</i> do Rádio VHF-22B, utilizado na aeronave Epsilon TB-30	59
B	Anexo B - Entrevista ao Chefe do Departamento de Operações Major João Caetano	61
C	Anexo C - Implementação para recepção e emissão FM	65
C.1	Recepção	67
C.1.1	<i>RTL-SDR 2832U</i>	67
C.1.2	<i>HackRF One</i>	68
C.2	Emissão	69
D	Anexo D - Implementação para recepção de sinal AM através do dispositivo <i>RTL-SDR 2832U</i>	71

Lista de Figuras

1.1	Dispositivo que permitia comunicações ar-solo durante a 1 ^a Guerra Mundial.	2
1.2	O UAV considerado nesta dissertação de mestrado, o ANTEX - X02 Alfa Extended. . . .	3
2.1	Princípios da introdução do sistema <i>L-band Digital Aeronautical Communications System</i> (LDACS) na aviação, adaptado de [19].	8
2.2	Rádio VHF-22B da <i>Collins Aerospace</i> , utilizado pela aeronave <i>Epsilon-TB30</i>	9
2.3	Dispositivo <i>RTL-SDR 2832U</i>	10
2.4	Diagrama de blocos de um recetor <i>Software Defined Radio</i> (SDR), adaptado de [13]. . . .	11
2.5	Diagrama de blocos de um transmissor SDR, adaptado de [13].	11
2.6	Gráfico comparativo da plataforma <i>GitHub</i> , adaptado de [35].	13
2.7	Circuito de modulação AM <i>Standard</i> , adaptado de [22].	14
2.8	Mensagem após ser modulada, adaptado de [22].	14
2.9	Circuito de modulação <i>Frequency Modulation</i> (FM), adaptado de [22].	15
2.10	Sinal modulado em fase, adaptado de [22].	15
2.11	Detetor de envolvente, adaptado de [22].	16
2.12	Recetor síncrono, adaptado de [22].	16
2.13	Circuito do desmodulador de FM utilizando conversor de FM para AM, adaptado de [22].	16
2.14	Sinal do desmodulador de FM utilizando conversor de FM para AM ao longo do circuito, adaptado de [22].	17
2.15	Circuito do desmodulador de FM através de <i>Phase Locked Loop</i> (PLL), adaptado de [22].	17
2.16	Densidade espectral de potência em AM Standard (canto superior esquerdo), <i>Double Side Band - Single Carrier</i> (DSB-SC) (canto superior direito), <i>Single Side Band</i> (SSB) (canto inferior esquerdo) e FM (canto inferior direito), adaptado de [22].	18
2.17	Comparação das relações Sinal/Ruído dos diferentes métodos, adaptado de [22].	18
3.1	Desenho técnico do sistema UAV utilizado pela Força Aérea Portuguesa (FAP), adaptado de [5].	22

3.2	Representação da baía de <i>payload</i> da aeronave Antex X02 Extended, adaptado de [5].	23
3.3	Arquitetura geral do UAV para comunicação com o solo.	26
4.1	Arquitetura geral do sistema proposto.	29
4.2	Diagrama de radiação de um dipolo genérico, adaptado de [4].	32
4.3	Dispositivo <i>HackRF One</i>	33
4.4	Esquema da implementação de um recetor AM através de um <i>HackRF One</i>	34
4.5	Esquema da implementação de um emissor AM através de um <i>HackRF One</i>	36
4.6	Diagrama do sistema a implementar, primeira versão.	37
4.7	Acordo de três vias, utilizado pelo <i>Transmission Control Protocol</i> (TCP), adaptado de [11].	38
4.8	Implementação em <i>GNU Radio Companion</i> para receção de sinal no UAV.	38
4.9	Implementação em <i>GNU Radio Companion</i> para receção de sinal na <i>Ground Station</i> (GS).	39
4.10	Implementação em <i>GNU Radio Companion</i> para transmissão de sinal na GS.	39
4.11	Implementação em <i>GNU Radio Companion</i> para transmissão de sinal no UAV.	40
4.12	Diagrama do sistema a implementar, versão final.	40
4.13	Janela da interface para o utilizador.	41
5.1	Sistema testado que simula o cenário real.	44
5.2	Rádio aeronáutico utilizado nos testes ao sistema.	45
5.3	Ilustração do teste realizado à receção.	47
5.4	Ilustração do teste realizado à transmissão.	48
5.5	Ilustração do teste realizado à transmissão seguida de receção e vice-versa.	48
5.6	Ilustração do teste realizado à recepção de comunicações da <i>Sintra Approach</i>	49
A.1	<i>Datasheet</i> do Rádio VHF-22B.	60
C.1	Esquema da Implementação de um Receptor FM através de um <i>RTL-SDR 2832U</i>	68
C.2	Esquema da Implementação de um Receptor FM através de um <i>HackRF One</i>	68
C.3	Esquema da Implementação de um Emissor FM através de um <i>HackRF One</i>	69
D.1	Esquema da Implementação de um Receptor AM através de um <i>RTL-SDR 2832U</i>	72

Lista de Tabelas

2.1	Comparação de classes de espaço aéreo.	7
2.2	Tabela adaptada de comparação entre os vários dispositivos disponíveis.	12
3.1	Tabela comparativa dos diferentes tipos de modulação.	25
4.1	Tabela de requisitos definidos para a dissertação de mestrado.	33
5.1	Tabela de avaliação de condições de áudio, adaptada de [17].	45
5.2	Tabela com os testes a realizar ao sistema.	46
5.3	Tabela com os resultados aos testes realizados ao sistema.	49

Lista de Abreviaturas

AFA	Academia da Força Aérea
AM	<i>Amplitude Modulation</i>
ANAC	Autoridade Nacional da Aviação Civil
ANACOM	Autoridade Nacional de Comunicações
CIAFA	Centro de Investigação da Academia da Força Aérea
CPU	<i>Central Process Unit</i>
DSB-SC	<i>Double Side Band - Single Carrier</i>
FAP	Força Aérea Portuguesa
FM	<i>Frequency Modulation</i>
GPS	<i>Ground Positioning System</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
GS	<i>Ground Station</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
HF	<i>High Frequency</i>
ILS	<i>Instrument Landing System</i>
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
LABAER	Laboratório Aeronáutico
LDACS	<i>L-band Digital Aeronautical Communications System</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
pDDL	<i>Pico Digital Data Link</i>
PTT	<i>Press To Talk</i>

QPSK	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
QNAF	Quadro Nacional de Atribuição de Frequências
RF	<i>Radio Frequency</i>
SESA	<i>Single European Sky ATM Research</i>
SSB	<i>Single Side Band</i>
SDR	<i>Software Defined Radio</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
USSB	<i>Upper Single Side Band</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VOR	<i>Very High Frequency Omnidirectional Range</i>
VCO	<i>Voltage-Controlled Oscillator</i>

1

Introdução

1.1 Enquadramento

Foi no ano de 1903 que a aviação surgiu através dos irmãos Wright, com o primeiro voo tripulado, e desde então tem evoluído nos sistemas de propulsão, navegação, controlo e comunicações, entre outros. O sistema de comunicações, mais concretamente, apenas surgiu alguns anos mais tarde. Inicialmente eram utilizadas placas coloridas, sinais de mãos e *flares* para comunicar com os pilotos, porém estes não tinham forma de comunicar de volta. Com o desenvolvimento das tecnologias de telegrafia sem fios, foi possível instalar nas aeronaves um dispositivo de comunicação através de código Morse, que foi utilizado pela primeira vez no ano de 1911 na guerra Italo-Turca.

Os primeiros rádios desenvolvidos, no início da 1^a Guerra Mundial, eram rudimentares, pesados e sem qualquer certificação ou garantia de fiabilidade (ver [15]), pelo que não eram instalados na maioria das aeronaves. No entanto, no ano de 1915 Charles Edmond Prince desenvolveu, com o auxílio da sua equipa, e testou o primeiro sistema de comunicações ar-solo utilizando um transmissor de radio telefonia (ver [25]), representado na Figura 1.1. Após efetuar esse teste, um dos ajudantes de Prince, Capitão J.M. Furnival, estabeleceu a *Wireless Training School*. Esta instrução tinha como finalidade formar 36 pilotos por semana na articulação da fala durante comunicações e em como operar o dispositivo (ver [15]).



Figura 1.1: Dispositivo que permitia comunicações ar-solo durante a 1^a Guerra Mundial.

Após terminar a 1^a Guerra Mundial, existiu um crescimento das comunicações aeronáuticas que fez com que em 1930 se generalizasse a instalação dos rádios nas aeronaves. Com a evolução do radar, em meados de 1930, foi possível associar estes dois sistemas, desempenhando um papel significativo no desenrolar da 2^a Guerra Mundial.

Nos dias de hoje o rádio continua a ter um papel fundamental no mundo da aviação pois permite a comunicação de voz entre pilotos e controladores aéreos, contribuindo para a segurança de todos os voos,

proporcionando uma adequada *situational awareness* dos pilotos enquanto efetuam o seu voo. Este papel não se aplica apenas a voos tripulados, pelo que os *Unmanned Aerial Vehicles* (UAVs) também têm essa necessidade.

1.2 Motivação e Objectivo

O Conceito Estratégico de Defesa Nacional apresentado pelo governo português define, entre outros assuntos, que deve ser mantida uma capacidade de controlo e vigilância do espaço marítimo associado ao território nacional, que devem ser racionalizados os meios na vigilância e assistência marítima, maximizando as capacidades e melhorando a eficiência no emprego dos meios, que devem ser prevenidas e preparadas reações a acidentes ambientais e catástrofes naturais e ainda optimizada a coordenação e utilização dos meios de combate às atividades criminais efetuadas no mar (ver [24]). Ora, a Força Aérea Portuguesa (FAP) tem cumprido estas missões através de aeronaves tripuladas, porém as aeronaves não tripuladas têm vindo a surgir como uma solução mais acessível em termos de manutenção, aquisição e meios de operação.

Com este objetivo em vista a FAP associou-se ao projeto da empresa Critical Software, em conjunto com outras entidades (Instituto de Sistemas e Robótica - Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa (ISR-IST-UTL), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e o Centro de Investigação Naval da Marinha Portuguesa (CINAV-MP)), para desenvolver um sistema que possua capacidades que possam contribuir para a geração de conhecimento situacional marítimo abordando aspetos como a deteção, classificação, identificação e seguimento de alvos, reconhecimento de padrões de comportamento e monitorização de parâmetros indicadores do bom estado ambiental (ver [5]).

Assim, na atualidade a FAP possui o UAV ANTEX - X02 Alfa Extended (resultado do projeto referido anteriormente), representado na Figura 1.2. O tipo de missões clarificados anteriormente por vezes é efetuada fora de espaço aéreo segregado, pelo que é necessário possuir equipamento que permita comunicar com as restantes aeronaves que se encontrem nesse espaço aéreo, o que não acontece neste momento.



Figura 1.2: O UAV considerado nesta dissertação de mestrado, o ANTEX - X02 Alfa Extended.

Para caracterizar a necessidade ora identificada foi elaborada uma entrevista ao chefe do Departamento de Operações Major João Caetano (ver Anexo B), que permitiu estabelecer os requisitos indicados para suprir as dificuldades identificadas.

Desta forma, os objetivos delineados para esta dissertação de mestrado são os seguintes:

- Estudo das comunicações aeronáuticas, com determinação de gamas de frequências e pré-requisitos necessários para garantir a comunicação de voz através do UAV;
- Estudo, implementação e validação de uma solução, de baixo custo, de comunicações aeronáuticas para a aeronave ANTEX-X02 Extended.

1.3 Estrutura

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos, descritos em seguida.

O Capítulo 1 apresenta o enquadramento do tema, com uma revisão histórica, explana quais as motivações que levaram à realização desta dissertação, bem como os objectivos finais propostos.

O Capítulo 2 é dividido em quatro secções. Inicialmente apresenta-se uma abordagem geral nas comunicações aeronáuticas, nomeadamente atribuição de frequências, enquadramento legal e perspectivas futuras. De seguida são estudadas as possíveis soluções para comunicação de voz, tendo uma secção dedicada à solução de *Software Defined Radio* (SDR). Por fim existe uma secção subordinada aos fundamentos das telecomunicações no âmbito das comunicações aeronáuticas.

No Capítulo 3 são analisados os sistemas do UAV, primeiramente com a análise dimensional e posteriormente com análise da arquitetura geral dos sistemas existentes no UAV, com particular ênfase para o piloto automático *Piccolo II*, o rádio de ligação de dados e a placa computacional de gestão dos componentes de bordo.

O Capítulo 4 inicia-se com a definição dos requisitos a cumprir na dissertação de mestrado. Com base nos critérios definidos, são escolhidos os equipamentos e *software* utilizado nesta tese. A secção seguinte tem como objectivo validar as implementações realizadas de forma individual, tendo em conta as diferentes funcionalidades do sistema. Após a validação é apresentado o diagrama do sistema proposto, com todas as rotinas integradas. Este capítulo termina com a apresentação da interface que permite ao utilizador comunicar através do sistema instalado na aeronave.

No Capítulo 5 são apresentados os critérios de avaliação propostos para testar o sistema, baseados em diferentes etapas com vista a validar todas as fases do programa, em diferentes utilizações. Seguidamente são apresentados os resultados dos testes realizados.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões principais desta dissertação, destacando-se os contributos alcançados com o trabalho desenvolvido. Para além disso, são enumeradas algumas propostas para trabalhos futuros.

2

Estado de Arte

Este capítulo irá abordar o Estado de Arte, dividido em 4 secções. Inicialmente, na Secção 2.1 serão analisadas as comunicações aeronáuticas, as principais características dos sistemas atuais e as perspetivas de evolução no futuro. Seguidamente, na Secção 2.2 são estudadas as soluções a implementar para atingir os objetivos delineados no Capítulo 1. Na Secção 2.3 é abordado o tema dos *Software Defined Radios* (SDR), tendo-se optado por uma abordagem em termos de *hardware* e depois uma componente de *software*. Finalmente, na Secção 2.4, são abordados conceitos teóricos de telecomunicações, com ênfase nos tipos de modulação e desmodulação.

2.1 Comunicações Aeronáuticas

As comunicações aeronáuticas são um dos principais sistemas presentes nas aeronaves e possuem uma importância inequívoca. Tipicamente, este sistema permite a troca de informação entre aeronaves e estruturas de controlo de tráfego. Para existir esta troca de informação é necessário que as plataformas (aeronaves, *Ground Station* (GS), entre outras) possuam rádios e que as comunicações sejam efetuadas em determinadas frequências, estabelecidas formalmente por entidades nacionais e internacionais.

2.1.1 Atribuição de Frequências

As comunicações aeronáuticas, estabelecidas através do espaço livre, são realizadas por intermédio de ondas electromagnéticas, ocupando diferentes gamas de frequência, tipicamente organizadas em 8 categorias. Esta alocação de frequências é realizada pela Autoridade Nacional de Comunicações (ANACOM) através do Quadro Nacional de Atribuição de Frequências (QNAF) (ver [1]), sendo que nesta dissertação de mestrado irão ser avaliadas 3 tendo em conta o contexto aeronáutico:

- A gama de frequências *High Frequency* (HF) vai desde os 3 MHz até os 30 MHz, existindo uma alocação de frequências em toda a banda consoante o destino ou localização. O espaçamento entre canais de frequências é de 3 kHz e existe diferenciação de frequências alocadas para voos civis e para voos militares. Este tipo de frequências tem como principal uso a utilização em voos oceânicos visto que em certas partes do voo não é possível captar as frequências mais elevadas (ver [1]);
- A gama de frequências *Very High Frequency* (VHF) está compreendida entre os 30 MHz e os 300 MHz, sendo que dentro desta gama ainda existe outra separação, para as comunicações aeronáuticas, entre os 108 MHz e os 117,95 MHz com 200 canais disponíveis de 50 kHz para ajudas rádio e entre os 118 MHz e os 137 MHz para transmissão de voz (ver [1]);
- A gama de frequências *Ultra High Frequency* (UHF) tem como limites os 300 MHz e os 3 GHz, dentro desta gama existe uma gama alocada às Forças Armadas, com frequências específicas para

cada ramo, para comunicações de voz com modulação de amplitude, na maior parte dos casos, compreendida entre os 225 MHz e os 399,95 MHz.

Tendo em conta que o principal objectivo desta dissertação de mestrado é desenvolver um sistema de comunicação de voz com aeronaves em voos de curto alcance, a banda de frequências que se irá utilizar será a gama de frequências VHF.

2.1.2 Enquadramento Legal

As comunicações aeronáuticas são reguladas a nível nacional, no âmbito civil, pela Autoridade Nacional da Aviação Civil (ANAC). No âmbito internacional a *International Civil Aviation Organization* (ICAO) coordena as relações diplomáticas dos seus países constituintes, no contexto aeronáutico (ver [12]). Estas organizações elaboram as restrições que vigoram no seu respetivo meio, sendo que é necessário analisar as normas de cada uma para se garantir que estas são cumpridas.

A ICAO estabelece que o espaço aéreo está dividido em 7 classes, sendo que em Portugal a ANAC estabelece 4 dessas 7. Destas classes destacam-se a *Golf* e *Delta*, visto serem aquelas que se pretendem utilizar pelo UAV operado nesta dissertação (Anexo B, Questão 3). A divisão e caracterização das classes encontram-se representadas na Tabela 2.1 (ver [3]).

Classes	Tipo de Voo Permitido	Comunicações	Autorização	Limites
A	Apenas são permitidos voos Instrument Flight Rules (IFR)	Obrigatório estabelecer comunicações ar-solo contínuas durante todo o voo	Autorização para voo obrigatória	A separação entre aeronaves é garantida pelos controladores aéreos
C	São permitidos voos IFR assim como Visual Flight Rules (VFR)	Obrigatório estabelecer comunicações ar-solo contínuas durante todo o voo	Autorização para voo obrigatória	A separação entre aeronaves de voos IFR com IFR e de IFR com VFR
D	São permitidos voos IFR assim como VFR	Obrigatório estabelecer comunicações ar-solo contínuas durante todo o voo	Autorização para voo obrigatória	A separação entre aeronaves de voos IFR é garantida sendo que os VFR podem requisitar informações em relação aos outros voos
G	São permitidos voos IFR assim como VFR	Voos IFR devem ter capacidade de estabelecer comunicações ar-solo, se forem necessárias	Autorização não é necessária	Não existe controlo de separação entre aeronaves mas existe informação de voo

Tabela 2.1: Comparação de classes de espaço aéreo.

Como referido anteriormente, os espaços aéreos utilizados pelo projeto desta dissertação de mestrado serão as classes *Golf* e *Delta*, logo é importante perceber quais as restrições associadas a um tipo de espaço aéreo que não requer autorização para circular e a separação de aeronaves é garantida pela comunicação entre as mesmas, como enunciado na Tabela 2.1.

Em Portugal é possível ouvir comunicações aeronáuticas, da aviação civil, desde que se possua o equipamento necessário para tal. Desta forma, em termos legais, parte do primeiro objectivo da dissertação de mestrado (possibilidade de ouvir comunicações de outras aeronaves nas proximidades do UAV) não apresenta qualquer problema. No que diz respeito à segunda parte (transmissão de comunicações de voz a partir do UAV), para voos civis é necessário obter uma licença junto da ANAC. Uma vez que o contexto

deste trabalho é a aplicação militar, recai na alçada da Autoridade Aeronáutica Nacional, da qual a Força Aérea Portuguesa está dependente.

2.1.3 Perspectivas Futuras

O caminho da evolução, nas comunicações aeronáuticas, está a ser feito no sentido de conseguir digitalizar o máximo de informação possível, sejam parâmetros de voo ou até comunicações de voz, para diminuir a necessidade de existirem comunicações de voz analógicas. A indústria aeronáutica tem sentido um crescimento em termos de tráfego aéreo que tem vindo a saturar as frequências alocadas, sendo que maximizando a quantidade de informação a ser transmitida através da via digital, o uso das frequências de voz irá diminuir.

Para isto a EUROCONTROL, através do projecto *Single European Sky ATM Research* (SESAR) tem desenvolvido uma tecnologia capaz de fazer face aos objetivos traçados. A iniciativa tem o nome de *L-band Digital Aeronautical Communications System* (LDACS) e pretende fornecer uma alternativa à transmissão de informação (ver [8]). Este sistema pretende utilizar a banda L, que se situa entre os 950 MHz e os 2150 MHz, através de *data-links* com opção de comunicação digital de voz.

Este tipo de comunicação é baseado numa tecnologia de *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM) que permite a comunicação entre os sistemas das aeronaves e as GSs.

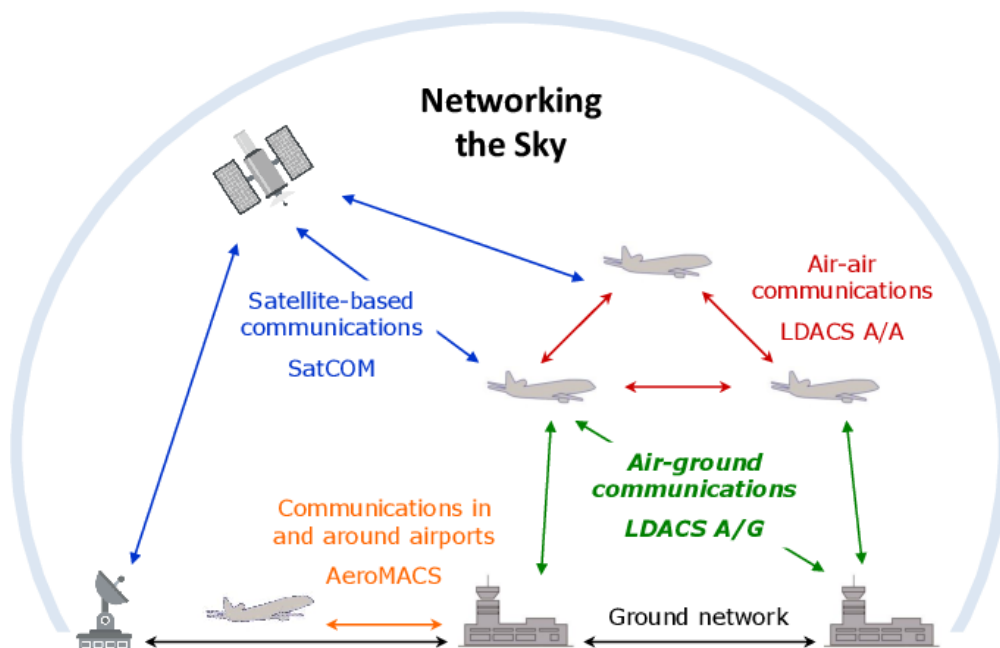


Figura 2.1: Princípios da introdução do sistema LDACS na aviação, adaptado de [19].

Numa caracterização mais técnica, este sistema pretende ter uma taxa de transmissão entre os 291 kbps e os 1.32 Mbps no que toca ao *Forward Link* (comunicação da GS para o dispositivo móvel) e 270

kbps a 1.27 Mbps para o *Reverse Link* (comunicação do dispositivo móvel para a GS - ver [29]), tem uma largura de banda projetada de 495.08 kHz e um mapeamento de símbolos do tipo *Quadrature Phase-Shift Keying* (QPSK).

No que diz respeito à implementação deste projeto, foram levantadas algumas questões relativamente à segurança do sistema, visto que informação crucial à circulação de aeronaves é transmitida por via digital. O sistema, por si só, não possui qualquer tipo de segurança inerente (ver [14]), portanto é necessário adicionar certos parâmetros aos sistemas de segurança, como por exemplo autenticações, autorizações, integridade, robustez, entre outros (ver [19]). Neste momento o projeto ainda se encontra numa fase de testes.

A implementação desta tecnologia no meio aeronáutico ainda não tem data estabelecida, pois ainda é necessário resolver algumas questões diretamente relacionadas com o sucesso do sistema, tais como questões de segurança. Deste modo é possível entender que a dissertação de mestrado não irá perder relevância, pois o sistema não se tornará obsoleto num futuro próximo.

2.2 Soluções Consideradas

Nesta secção são descritas as diferentes alternativas de equipamentos de comunicações aeronáuticas, que poderão ser utilizados como solução para dar resposta aos objetivos desta dissertação. Querendo assegurar as comunicações do UAV, o primeiro equipamento considerado será um rádio aeronáutico convencional, visto que este é o utilizado pelas aeronaves para comunicação entre as mesmas e a GS. Podemos analisar, a título de exemplo, o rádio presente na aeronave *Epsilon-TB30* da FAP, presente na Figura 2.2.



Figura 2.2: Rádio VHF-22B da *Collins Aerospace*, utilizado pela aeronave *Epsilon-TB30*.

No entanto, esta solução apresenta algumas restrições, nomeadamente, como é possível consultar no seu *datasheet* (ver [31]) no Anexo A, este apresenta dimensões excessivas para permitir a sua instalação no UAV. Para além disso, seria necessário ter um sistema adaptado, pois estes rádios são desenvolvidos para ter pilotos no *cockpit* e não um operador no solo. Assim é necessário consultar quais os rádios disponíveis no mercado, destinados a UAVs. Algumas opções são disponibilizadas pelas seguintes empresas: *Cobham Aerospace*, *Triad RF Systems*, *Unmanned Systems Source*, entre outras. Estas soluções, apesar de muito viáveis, acarretam um encargo financeiro demasiado elevado para o sistema pretendido (ver [36] e [28]).

Desta feita, as soluções apresentadas são pesadas, volumosas ou dispendiosas para serem adquiridas pela FAP, pelo que existe necessidade de averiguar outra solução.

Desta forma, afigura-se como plausível a possibilidade de desenvolver um sistema que fizesse face aos objetivos apresentados nesta dissertação. Para tal, foi ponderado o sistema de rádio maioritariamente em *software*, visto que se torna adaptável a qualquer implementação pretendida. Assim, foi estudada a solução SDR, que não apresenta custos elevados e todo o material que, normalmente, está instalado num rádio convencional passa a estar na forma de código, dependendo da plataforma utilizada. Este sistema pode mais tarde ser adaptado a qualquer alteração associada à missão, aeronave ou limitação tecnológica, tornando-se uma solução versátil e duradoura.

Inicialmente decidiu-se optar por uma solução simples para familiarização com os sistemas SDRs. Por questões relacionadas com as aquisições dos dispositivos e dada a disponibilidade do equipamento *RTL-SDR 2832U* (Figura 2.3) no laboratório do Centro de Investigação da Academia da Força Aérea (CIAFA), este foi o escolhido para se iniciarem as implementações de receção de sinal *Amplitude Modulation* (AM) e consequente validação.



Figura 2.3: Dispositivo *RTL-SDR 2832U*.

2.3 *Software Defined Radios*

Esta secção do trabalho servirá para introduzir uma componente importante da dissertação de mestrado, a plataforma dos *Software Defined Radios*. Esta irá estar dividida em duas frações distintas, inicialmente irá ser abordado o tema dos *hardware* disponíveis, quais as suas características e feita a sua comparação. De seguida, na subsecção referente ao *software*, são analisadas as soluções disponíveis, bem como quais as vantagens associadas a cada uma.

O termo *Software Defined Radio* foi criado por Joseph Mitola no ano de 1993, e definiu-o como sendo “a set of digital signal processing (DSP) primitives, a metalevel system for combining the primitives into communication system functions (transmitter, channel model, receiver, etc.), and a set of target processors on which the software radio is hosted for real-time communications” (ver [18]). Esta definição permite entender qual o objetivo do conceito, ou seja, os SDRs pretendem proporcionar uma ferramenta de comunicações em tempo-real, maioritariamente constituído por *software*.

2.3.1 Hardware

Relativamente à primeira parte desta subsecção, é necessário perceber qual o dispositivo mais indicado para o objetivo proposto nesta dissertação de mestrado, assim são consideradas três categorias diferentes:

- SDR apenas com capacidade de receção de sinal, como demonstrado genericamente na Figura 2.4;

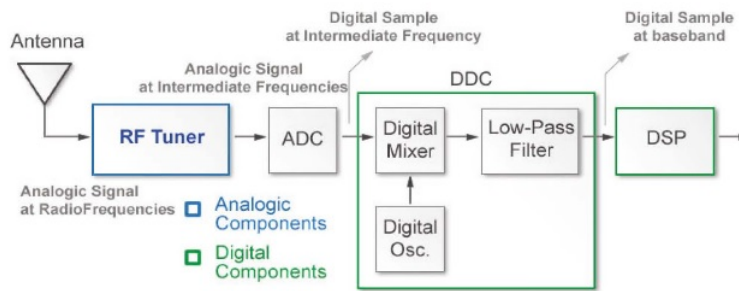


Figura 2.4: Diagrama de blocos de um recetor SDR, adaptado de [13].

- SDR com recetores e transmissores, no entanto só consegue fazer uma das acções de cada vez (*Half-Duplex*), como demonstrado genericamente na Figura 2.4 (recetor) e na Figura 2.5 (transmissor);
- SDR com recetores e transmissores, com capacidade de transmitir e receber ao mesmo tempo (*Full-Duplex*), como demonstrado genericamente na Figura 2.4 (recetor) e na Figura 2.5 (transmissor).

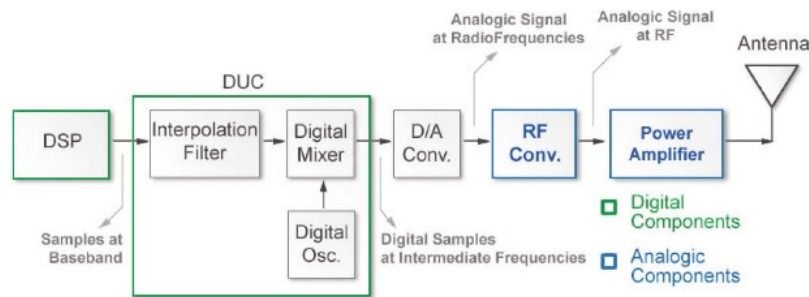


Figura 2.5: Diagrama de blocos de um transmissor SDR, adaptado de [13].

Para poder realizar a comparação entre equipamentos adaptou-se a Tabela 2.2, onde estão presentes alguns dispositivos disponíveis no mercado.

	Banda de Frequências	Potência de Saída	Max. Largura de Banda	Resolução ADC	Capacidade de Transmitir	Preço
<i>RTL-SDR 2832U</i> [27]	500 kHz - 1766 MHz	-	2.4 MHz	8 Bits	Não	~20€
<i>AirSpy R2</i> [2]	24 - 1750 MHz	-	10 MHz	12 Bits	Não	~150€
<i>Funcube Pro+</i> [9]	150 kHz - 240 MHz e 420 - 1900 MHz	-	20 MHz	16 Bits	Não	~187€
<i>HackRF One</i> [37]	1 - 6000 MHz	3 - 30 mW	20 MHz	8 Bits	Sim (<i>Half-Duplex</i>)	~266€
<i>BladeRF</i> [21]	300 - 3800 MHz	~3 mW	28 MHz	12 Bits	Sim (<i>Full-Duplex</i>)	~374€
<i>USRP E312</i> [7]	70 - 6000 MHz	~10 mW	56 MHz	12 Bits	Sim (<i>Full-Duplex</i>)	~600€
<i>MatchStiq S10</i> [6]	70 - 6000 MHz	~20 mW	50 MHz	12 Bits	Sim (<i>Full-Duplex</i>)	~4000€

Tabela 2.2: Tabela adaptada de comparação entre os vários dispositivos disponíveis.

2.3.2 Software

Para programar as rotinas digitais de um SDR, a escolha do *software* de suporte é fundamental no processo de utilização do dispositivo, dependendo dos objetivos delineados. Como referido anteriormente, o intuito desta dissertação leva a uma análise das alternativas existentes, podendo dividi-las em três grupos:

- *Software* para aplicações de *Radio Frequency* (RF) de âmbito geral, que permite sintonizar um sinal rádio, independentemente da modulação e finalidade. Alguns exemplos podem ser o *SDR#*, o *HDSDR*, o *Linrad*, etc;
- *Software* com um propósito específico, em que apenas pode ser utilizado para uma finalidade. Alguns exemplos incluem o *RTL-FM* (programa que corre em linha de comandos e permite receber sinais *Frequency Modulation* (FM)), o *RTL-UDP* (programa que recebe sinais FM e os transmite através de *User Datagram Protocol* (UDP)), o *RTLSDR Scanner* (que permite através de um gráfico analisar o espectro numa plataforma baseada em *python*), etc;
- *Software* destinado a fins académicos e de desenvolvimento, nomeadamente construção de funcionalidades do rádio através de blocos e funções disponíveis no *software*. Alguns exemplos podem ser o *GNU Radio*, o *LUA Radio*, o *MatLab*, etc.

Deste modo, é possível entender que o grupo que melhor se adequa à finalidade desta dissertação de mestrado é o *software* destinado a fins académicos ou de pesquisa, no entanto, ainda é necessário seleccionar dentro deste grupo qual o *software* a utilizar. Alguns parâmetros a ter em conta podem ser, compatibilidade de sistemas operativos, linguagem do programa e facilidade de interação.

Tendo em conta todos os parâmetros supra-referidos, é inevitável analisar as propriedades de cada opção, para existir comparação das mesmas.

A opção *GNU Radio* foi desenvolvida em 2001, mais especificamente a ferramenta *GNU Radio Companion*, que foi apresentada ao mercado em 2009. Esta ferramenta possibilita a implementação de recetores ou emissores através da conjugação e interligação de diferentes blocos. Estes blocos implementam diversas funcionalidades, como a possibilidade de receber sinais através de um dispositivo SDR, aplicar funções de processamento de sinal, remetê-los para as colunas ou enviar dados através de um sistema de UDP

ou *Transmission Control Protocol* (TCP). Para além da interface gráfica, o *GNURadio* gera o código em *Python* e pode ser corrido em *Windows* e sistemas de distribuição *Linux*, sendo de salientar o facto de se tratar de um sistema de utilização livre (ver [38]).

Existe ainda a opção do *MatLab-Simulink*, onde é possível através de blocos operar os dispositivos RTL-SDR, no entanto, o programa utiliza linguagem *MatLab*. A funcionalidade de SDR só foi introduzida em 2014, não apresentando ainda uma base de utilizadores vasta. Para além disso o *software* carece de aquisição de uma licença (ver [16]).

Outra opção que poderia ser viável seria o programa *LuaRadio*, que é similar à implementação do *GNU Radio Companion*, no entanto é estruturado na linguagem *LuaJit* (ver [30]). O programa é mais leve devido à linguagem utilizada, tem uma interface muito semelhante à utilizada no *GNU Radio Companion* e apenas está disponível para os sistemas operativos de distribuição *Linux* e *MacOS*.

Para existir um método de comparação entre as alternativas, foi consultado o *website GitHub*, que é uma plataforma de código *open source* e funciona como repositório relativo à área da programação e *software* (ver [10]). Foi possível encontrar gráficos de comparação da utilização das diferentes linguagens computacionais no *website*, apresentado na Figura 2.6.

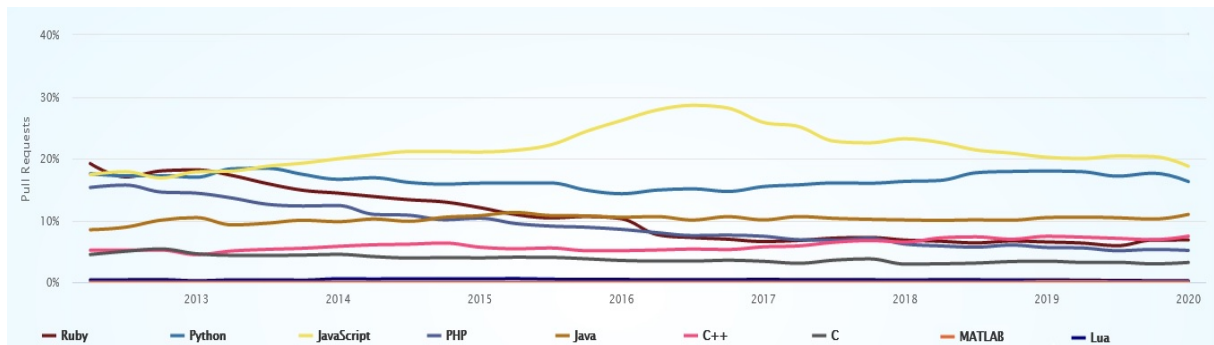


Figura 2.6: Gráfico comparativo da plataforma *GitHub*, adaptado de [35].

2.4 Fundamentos de Telecomunicações

Esta secção tem como principal objectivo efetuar a caracterização da gama de frequências VHF, que está compreendida entre os 30 MHz e os 300 MHz. Esta caracterização irá focar-se no tipo de modulação imposta pelas condicionantes legais que determinam as frequências e respetiva modulação. De seguida será feita uma descrição das restantes modulações existentes, concluindo esta secção com a comparação entre elas.

A gama de frequências VHF está compreendida entre os 30 MHz e 300 MHz, no entanto, para comunicações aeronáuticas, apenas estão alocadas as frequências entre os 108 MHz e os 137 MHz (ver [1]). Dentro desta gama existe ainda outra separação, numa primeira banda entre os 108 MHz e os 117.95 MHz que se encontra totalmente dedicada a ajudas rádio, como por exemplo o *Very High Frequency*

Omnidirectional Range (VOR) e a vertente do localizador do *Instrument Landing System* (ILS). A segunda banda está compreendida entre os 118 MHz e os 137 MHz e tem como propósito a transmissão de voz entre dispositivos. Os canais nesta banda estão distribuídos numa de duas maneiras: i) canais com espaçamento de 25 kHz e ii) canais com espaçamento de 8,33 kHz. Esta necessidade de espaçamento de canais de 8,33 kHz surgiu devido à saturação das comunicações de voz causadas pelo crescimento do tráfego aéreo, possibilitando assim um aumento de três vezes no número de canais disponíveis, passando de 760 para 2280 canais.

As comunicações aeronáuticas são, desde os seus primórdios, comunicações analógicas visto esta ter sido a tecnologia disponível. Dentro das comunicações analógicas é possível ter 2 tipos de modulação (ver [22]), em amplitude e em fase. Qualquer modulação, de forma genérica pode ser caracterizada pela seguinte expressão:

$$s(t) = B(t)\cos[w_0t + \theta(t)]. \quad (2.1)$$

Quando existe modulação em amplitude o factor $B(t)$ é variável e $\theta(t)$ é constante, relativamente à modulação de fase é precisamente o oposto, o factor $B(t)$ permanece constante e o valor de $\theta(t)$ é variável.

Iniciando com a modulação em amplitude, dentro da gama de frequências pretendida, vai existir uma modulação AM *standard*, com um circuito demonstrado na Figura 2.7.

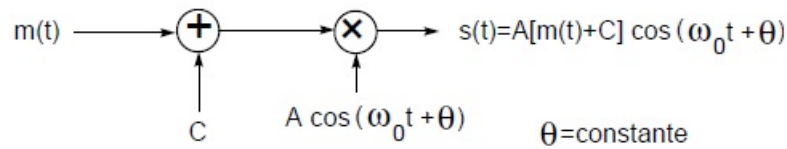


Figura 2.7: Circuito de modulação AM *Standard*, adaptado de [22].

Sendo que, após ser modulada, a mensagem terá o seguinte andamento em função do tempo, genericamente demonstrado na Figura 2.8.

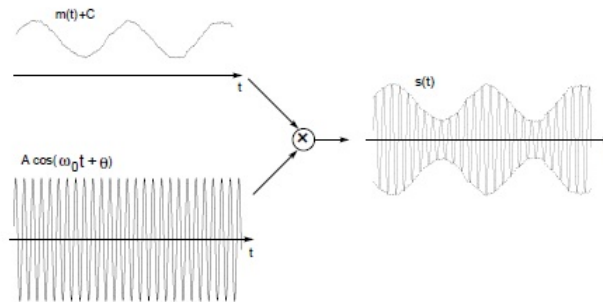


Figura 2.8: Mensagem após ser modulada, adaptado de [22].

De notar que existem outros tipos de modulação em amplitude, como por exemplo a *Double Side Band - Single Carrier* (DSB-SC) ou a *Single Side Band* (SSB). A SSB é utilizada nas comunicações aeronáuticas na banda das HF, normalmente a *Upper Single Side Band* (USSB) (ver [32]).

Existe ainda a modulação em frequência, em que o circuito pode ser demonstrado na Figura 2.9.

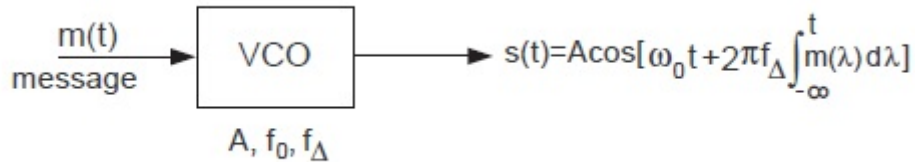


Figura 2.9: Circuito de modulação FM, adaptado de [22].

Este circuito é composto por um *Voltage-Controlled Oscillator* (VCO), que é caracterizado por 3 parâmetros, o parâmetro A que representa a amplitude do sinal modulado (que é constante), o parâmetro f_0 que representa a frequência central e o parâmetro f_Δ que representa a sensibilidade da frequência. Estes parâmetros serão necessários para definir a frequência instantânea dada por

$$f_i(t) = f_0 + f_\Delta m(t). \quad (2.2)$$

Um sinal genérico modulado em frequência terá o aspeto da Figura 2.10

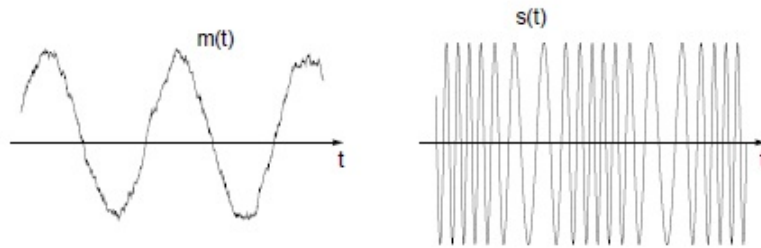


Figura 2.10: Sinal modulado em fase, adaptado de [22].

Quando o sinal é recebido é necessário efectuar a sua desmodulação para obter a mensagem inicial, dependendo da modulação utilizada as técnicas de desmodulação são também diferentes. No que diz respeito à modulação em amplitude existem soluções para os diferentes tipos de modulação. Para a modulação em amplitude *standard* são, normalmente, utilizados detetores de envolvente (Figura 2.11) pois são uma solução mais económica e menos complexa face aos recetores síncronos (Figura 2.12), utilizados na DSB-SC e SSB.

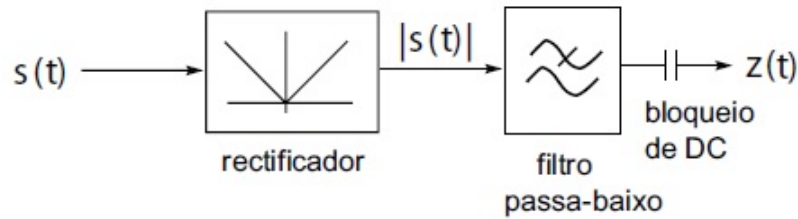


Figura 2.11: Detetor de envelope, adaptado de [22].

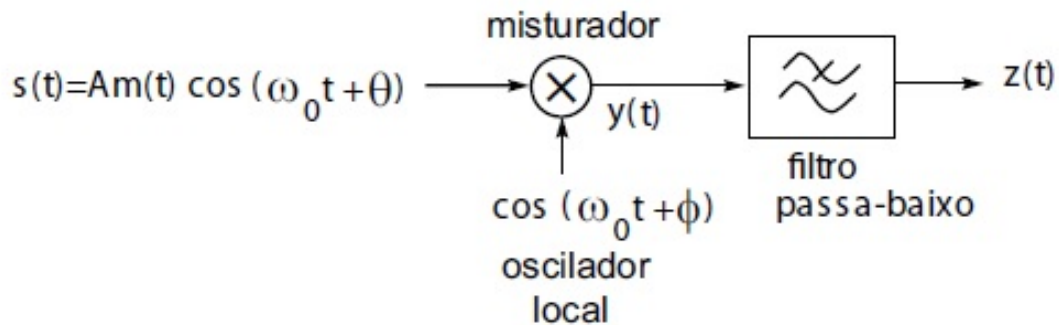


Figura 2.12: Recetor síncrono, adaptado de [22].

Da mesma forma, a modulação de fase apresenta algumas soluções para a sua desmodulação. Uma vez que, das soluções apresentadas anteriormente a mais económica e menos complexa seria o detetor de envelope, uma das soluções de desmodulação de um sinal modulado em fase é convertê-lo num sinal modulado em amplitude e depois desmodula-lo através de um detetor de envelope, conforme apresentado na Figura 2.13. Porém existem outras soluções como o *Phase Locked Loop* (PLL). Este sistema é composto por 3 elementos, o detetor de fase, o filtro passa-baixo e o VCO em retro-alimentação, demonstrado na Figura 2.15.

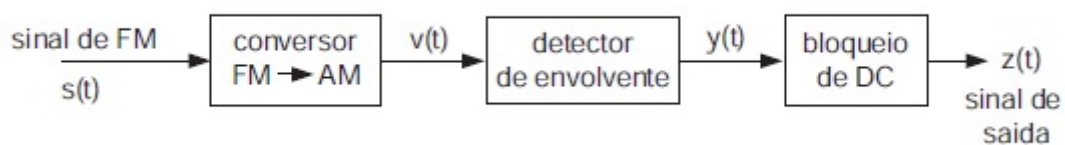


Figura 2.13: Circuito do desmodulador de FM utilizando conversor de FM para AM, adaptado de [22].

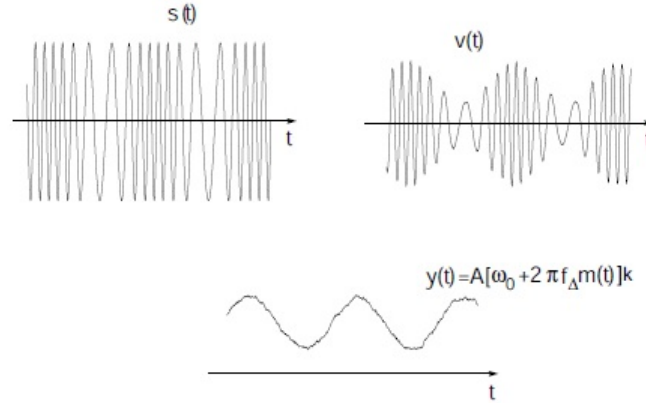


Figura 2.14: Sinal do desmodulador de FM utilizando conversor de FM para AM ao longo do circuito, adaptado de [22].

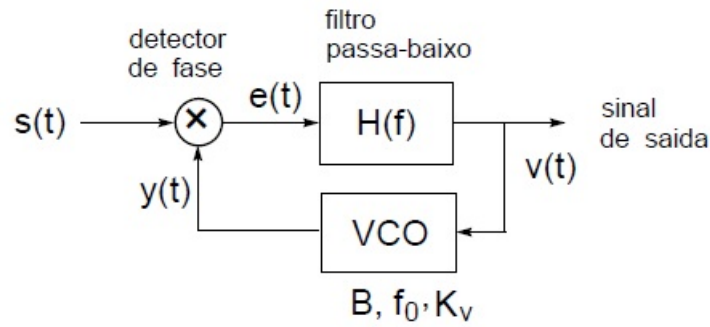


Figura 2.15: Circuito do desmodulador de FM através de PLL, adaptado de [22].

Um ponto de comparação a ter em conta são as larguras de banda utilizadas por cada modulação. No que diz respeito à modulação de amplitude o valor da largura de banda será $B = 2W$, o mesmo acontece para DSB-SC. No entanto, a modulação SSB, como o próprio nome indica, apenas vai utilizar metade da largura de banda das restantes, ou seja, $B = W$. Por fim, a modulação FM tem uma fórmula para a largura de banda que vai depender da regra de Carson (que é uma aproximação), portanto tem-se

$$B = 2(\beta + 1)W, \quad (2.3)$$

onde β é dado por

$$\beta = \frac{f_{\Delta \max}[|m(t)|]}{W}. \quad (2.4)$$

Analisando a equação 2.3 é possível perceber que, para qualquer valor de β , temos que a largura de banda será maior que $2W$, logo a largura de banda de uma modulação FM será sempre maior que a de uma

AM, como é possível perceber na Figura 2.16.

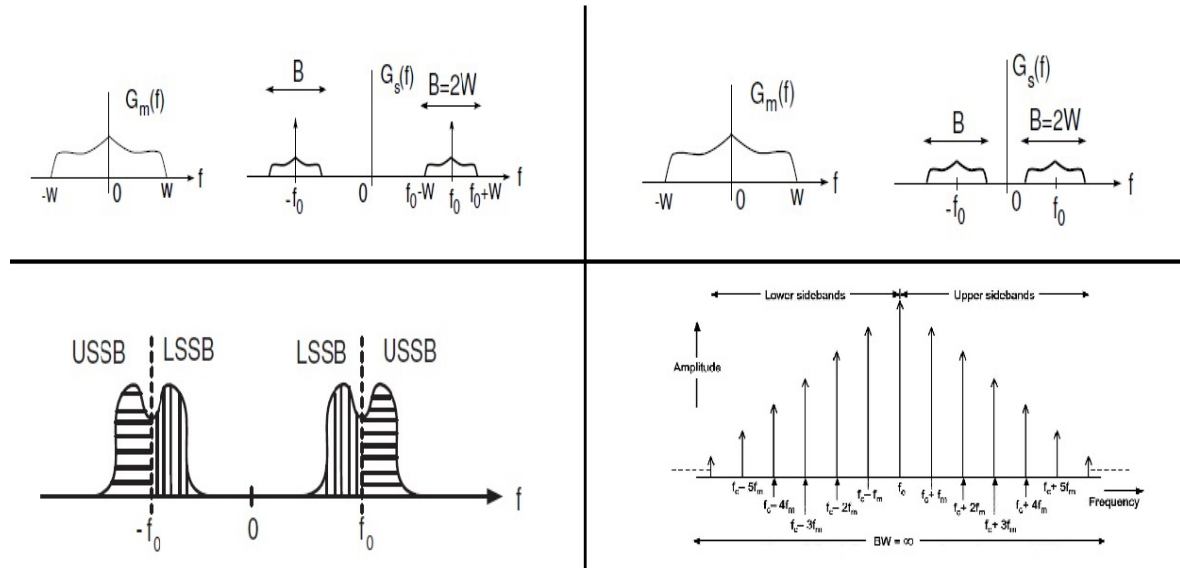


Figura 2.16: Densidade espectral de potência em AM Standard (canto superior esquerdo), DSB-SC (canto superior direito), SSB (canto inferior esquerdo) e FM (canto inferior direito), adaptado de [22].

Tendo em consideração as variadas técnicas de modulação e desmodulação e respectivas larguras de banda, existem algumas vantagens em determinados métodos. Desta maneira, e analisando a Figura 2.17, pode-se chegar a algumas conclusões, descritas em seguida.

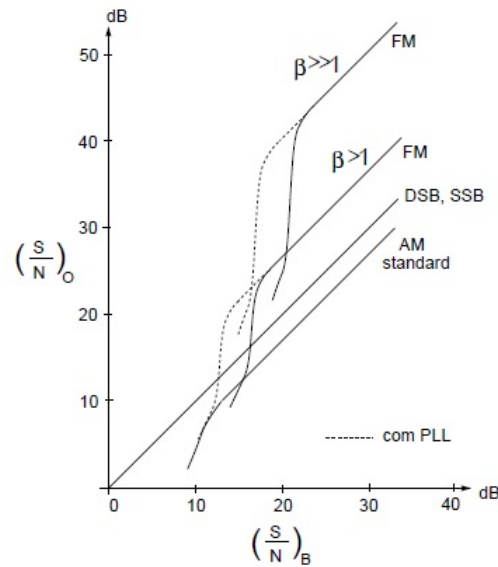


Figura 2.17: Comparação das relações Sinal/Ruído dos diferentes métodos, adaptado de [22].

É possível inferir que, com o aumento da relação sinal-ruído em banda de base $(S/N)_B$, temos um melhor resultado para a modulação em frequência, no sentido oposto, quando $(S/N)_B$ diminui, a mo-

dulação que apresenta melhores resultados é a DSB-SC e a SSB. Outra informação que podemos inferir do gráfico é que os sistemas de modulação AM, DSB-SC e em especial o SSB, são bastante mais eficazes quanto à largura de banda utilizada. De notar que, apesar de tornar a implementação mais complexa, a utilização do PLL aumenta a capacidade da modulação FM para larguras de banda mais baixas.

Tendo em consideração todos os pontos abordados, é possível identificar mais duas vantagens da utilização da modulação em amplitude, para a banda de frequências pretendida.

- O início da utilização do rádio em aeronaves como conhecemos hoje deu-se em meados dos anos 30, no entanto, foi durante a 2^a Guerra Mundial que a evolução da capacidade e alcance dos rádios se deu, trazendo assim uma globalização da sua utilização. A tecnologia da altura era mais focada para a modulação em amplitude, visto que esta era mais barata, logo os rádios implementados em todas as aeronaves foram com modulação em amplitude.
- A modulação em frequência apresenta uma grande desvantagem conhecida como "*Capture Effect*". O *Capture Effect* é um fenómeno que faz com que a frequência que está a ser utilizada não possa ser interrompida, ou seja, se alguém estiver a transmitir nessa frequência, mesmo que se tente interromper e falar, não se consegue fazer e não se recebe qualquer tipo de aviso que a informação não foi comunicada. Este tipo de restrição é bastante perigosa no meio aeronáutico, principalmente em situações de emergência, pelo que na modulação em amplitude é possível perceber que existem duas ou mais comunicações ao mesmo tempo, podendo assim geri-las.

3

UAV Considerado

O capítulo UAV Considerado será fundamental para compreender a relação entre todos os sistemas constituintes da aeronave, sejam eles afetados diretamente, ou indiretamente pelas implementações desenvolvidas. Primeiramente, serão apresentadas as dimensões físicas da aeronave para melhor compreender o seu tamanho relativamente aos seus sistemas. Na Secção 3.2 apresenta-se a forma como os sistemas da aeronave comunicam entre si, para identificar qual a integração mais adequada do sistema em estudo. Esta Secção será dividida em 3 grupos, o piloto automático *Piccolo*, a placa *Jetson TX2* e, por fim, o rádio *PDDL900*.

3.1 Dimensões da Aeronave

O primeiro tema a abordar serão as dimensões físicas do UAV, para melhor entender quais as grandezas envolvidas e quais as suas limitações. Assim, é de notar que o UAV apresenta uma envergadura de 3,5 m, um comprimento de 1,9 m e uma altura de 0,6 m. O *ANTEX - X02 ALFA Extended* possui um peso máximo de 25 kg à decolagem, sendo que a estrutura, sistema propulsivo e superfícies atuadoras pesam 12 kg (ver [5]).

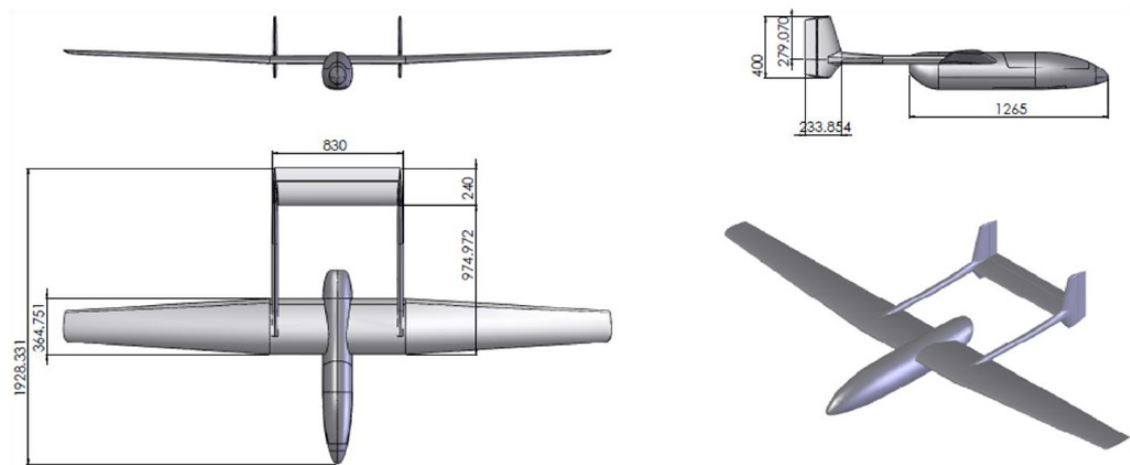


Figura 3.1: Desenho técnico do sistema UAV utilizado pela FAP, adaptado de [5].

É necessário avaliar o UAV nas componentes afetadas pela futura instalação do SDR, sendo elas o consumo de energia, o volume ocupado na aeronave e o peso associado ao dispositivo.

Sendo que são disponibilizados 100 Watts de energia fornecidos pelo gerador do Antex X02 Extended e um consumo típico dos sistemas é de 45 Watts, tem que ser considerado o consumo do dispositivo instalado, de maneira a não pôr em risco a operação do UAV (ver [5]).

O volume disponível pode ser avaliado pela Figura 3.2, onde está representada a baía de *payload* e o espaço correspondente, sendo necessário ter em conta o volume ocupado pelo dispositivo. É seleccionada

a baía de *payload* visto que neste espaço apenas estão instaladas as câmeras enquanto que, no sistema de navegação e controlo, encontram-se instalados computadores, baterias, o *Piccolo*, a placa de gestão de energia, entre outros.

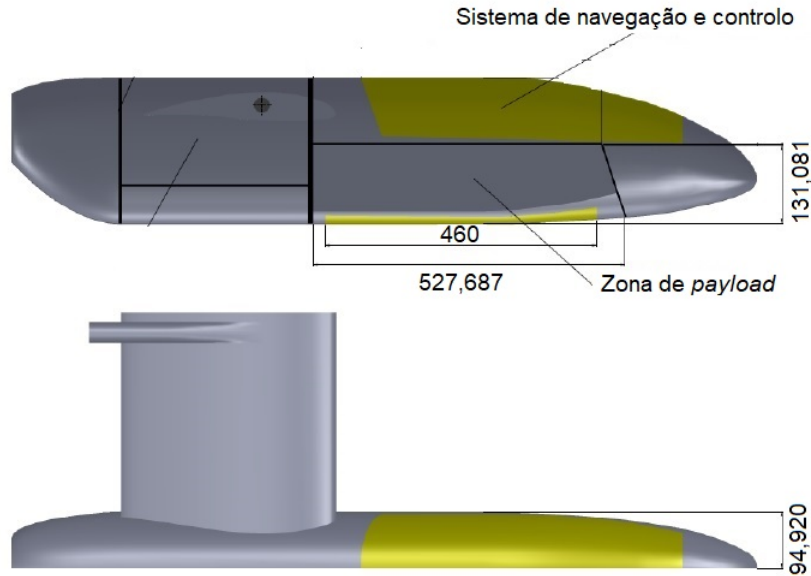


Figura 3.2: Representação da baía de *payload* da aeronave Antex X02 Extended, adaptado de [5].

Analisando a Figura 3.2, é possível calcular o volume total disponível, de forma aproximada. Aproximando a forma para um paralelepípedo, assume-se os valores de largura de ~ 190 mm (a) ($2 \times 94,9$ mm), um comprimento de ~ 527 mm (b) e uma profundidade de ~ 131 mm (c). Através da fórmula do volume,

$$V = a * b * c, \quad (3.1)$$

obtém-se um volume total de $0,013m^3$. Tendo em conta que existem mais equipamentos instalados e que estes podem ser movidos para acomodar o dispositivo, é possível disponibilizar um volume de $0,005m^3$.

Por fim, é necessário ter em conta o peso associado ao dispositivo instalado. Este não deve exceder os 500 g, para que o peso total da aeronave à decolagem não ultrapasse os 25 kg, não perturbando assim, significativamente, a posição do centro de gravidade da aeronave.

3.2 Sistemas

De forma a projetar a funcionalidade de receção e transmissão de comunicações aeronáuticas a bordo de um UAV, é necessário listar os vários subsistemas do veículo e compreender de que forma é que comunicam entre si. Desta feita, inicialmente será apresentada a arquitetura geral que relaciona os diferentes sistemas instalados num UAV, de seguida será explanado qual o subsistema que pretendemos atualizar e como

este se relaciona com os restantes.

No caso do UAV abordado nesta dissertação de mestrado e utilizado pela FAP, no contexto do CIAFA, os sistemas podem ser distribuídos em 7 grupos (ver [5]), que são:

- Sistema Estrutural, inclui fuselagem, asa, superfícies estabilizadoras, superfícies de controlo de voo e trem de aterragem;
- Sistema de Propulsão, é responsável por gerar a força que impulsiona a aeronave em voo;
- Sistema de Comunicações, é responsável por permitir todas as comunicações da aeronave e sensores embarcados;
- Sistema Secundário de Voo, é responsável pela implementação de capacidades adicionais aos sistemas aviónicos;
- Sistema de Energia, tem como função disponibilizar a energia necessária aos restantes sistemas da plataforma;
- Sistema de *Payload*, é responsável por capacitar a plataforma dos sensores apropriados para o cumprimento das missões propostas;
- Sistema Primário de Voo, é responsável por realizar a navegação primária, o planeamento do voo, a previsão de trajetória, os cálculos de desempenho e orientação das plataformas.

Dos sistemas enunciados o que se pretende atualizar é o de comunicações, com vista a poder implementar um sistema para viabilizar a troca de comunicações de voz com outras aeronaves em voo. Desta maneira a arquitetura geral da aeronave será analisada seguidamente.

3.2.1 Arquitetura Geral

A arquitetura da aeronave inclui 2 grandes elementos, a placa computacional *Jetson TX2* e o piloto automático *Piccolo* que comunicam entre si e também com a GS.

A placa computacional *Jetson TX2* tem como principais objetivos fazer as ligações entre todos os sistemas da aeronave. Através desta placa computacional o piloto automático *Piccolo*, pode ligar-se à estação de solo através de uma ligação com conectividade IP (através do rádio pDDL900). Adicionalmente, esta placa computacional permite executar rotinas de *software* que processam os dados recolhidos a bordo. Esta capacidade de computação significativa é possível graças à arquitetura Pascal, produzida na *NVIDIA*, que tem 256 núcleos na *Graphics Processing Unit* (GPU) e ainda 2 núcleos Denver mais 4 núcleos ARM A57 completando a *Central Process Unit* (CPU), sendo a GPU e a CPU bastante adequadas a serem utilizados para cálculo paralelo. Tendo uma potência variável de 7.5 Watts ou 15 Watts

(dependendo do modo seleccionado)', consegue ser 25 vezes mais eficiente que o correspondente estado de arte em versão *desktop*.

No que respeita ao *Piccolo* este comanda as superfícies de controlo da aeronave, fornece informações de telemetria de voo e garante um canal de comunicações com a GS (ver [23]). A versão utilizada é a *Piccolo II*, esta versão possui um micro-controlador que executa algoritmos de estabilização e navegação da plataforma, sendo o responsável pela malha interna de controlo do UAV. Em termos de capacidades este piloto automático possui um recetor de *Ground Positioning System* (GPS), uma unidade inercial com acelerómetros e giroscópios, um rádio incorporado, capacidade para cumprir vários tipos de missões, entre outras. O *Piccolo II* assegura a comunicação através de portas de comunicação de série e é através destas que todos os sistemas secundários e de comunicações são integrados com o piloto automático, conferindo-lhe desta forma capacidades adicionais, como por exemplo aterragem e descolagem autónoma ou comunicação por satélite com a estação terrestre.

O rádio *Pico Digital Data Link* (pDDL) pode ser operado na versão de 900 MHz ou na versão de 2.4 GHz, e tem como principal função garantir a comunicação da estação na aeronave com a GS. Os rádios podem ter acoplados amplificadores que permitem incrementar a potência de saída. Estes amplificadores terão diferentes valores de potência de saída dependendo do tipo de modulação utilizada, estes valores podem ser consultados na Tabela 3.1, adaptada de [33].

Modulação	Potência
QAM 64	8 W
QAM16	10 W
QPSK	13 W

Tabela 3.1: Tabela comparativa dos diferentes tipos de modulação.

Todo o sistema possui uma interface que possibilita a configuração de certos parâmetros que melhor correspondam à missão pretendida. Entre eles está a taxa de transmissão de dados, que pode variar entre os 300 bps e os 921600 bps, entre outros parâmetros (ver [34]).

Analisando a Figura 3.3, é possível perceber que o dispositivo SDR será ligado à placa computacional *Jetson TX2*, que fará a leitura dos dados captados e, através de uma conexão via *ethernet*, irá enviar os dados por intermédio de um rádio pDDL900 para o segmento solo. Neste segmento estará um computador com ambiente de distribuição Linux que controla as funções ligadas ao *payload*. Neste computador irá existir uma interface que permitirá ao operador comunicar, numa frequência à escolha, com outras aeronaves.

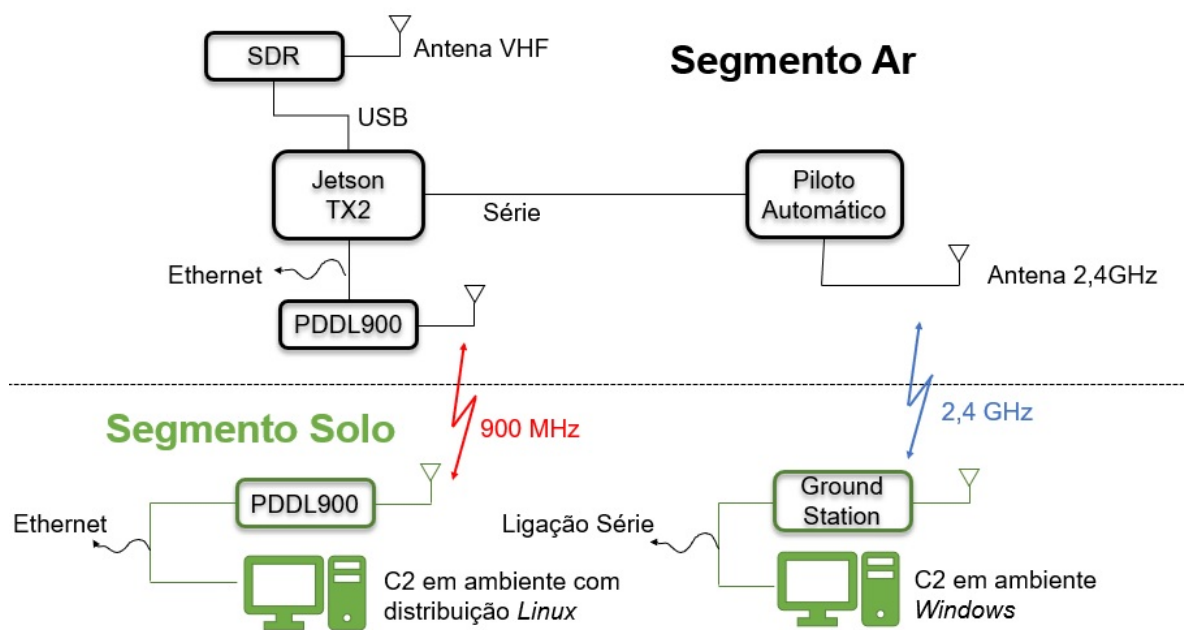


Figura 3.3: Arquitetura geral do UAV para comunicação com o solo.

4

Sistema Proposto

Este capítulo terá como propósito apresentar a solução que foi desenvolvida para permitir aos operadores realizarem comunicações de voz. Esta apresentação irá detalhar os requisitos associados ao sistema, a definição do equipamento de *hardware* e *software* a utilizar, a arquitetura geral do sistema, a validação das rotinas de *software* a serem usadas no SDR e a interface gráfica.

4.1 Requisitos

Nesta secção serão identificados os requisitos que terão de ser cumpridos pela solução a desenvolver. Esta secção está dividida em 3 partes, onde são abordadas diferentes áreas que permitem a definição de requisitos próprios. Na Subsecção 4.1.1 é abordada a arquitetura geral do UAV e quais os requisitos que a mesma impõe. De seguida, na Subsecção 4.1.2 são abordadas as limitações associadas à integração no UAV e na Subsecção 4.1.3 são definidos os requisitos de telecomunicações. Por fim, será apresentada a tabela de resumo dos requisitos.

4.1.1 Arquitetura Geral

Inicialmente será necessário determinar quais as funções que são pretendidas no segmento de solo e quais são pretendidas no segmento aéreo. Para isso, foi desenvolvido o diagrama representado na Figura 4.1, que representa as diferentes funcionalidades de cada um dos segmentos. Neste diagrama, existe o segmento do UAV, onde será instalada uma plataforma computacional e um rádio SDR. Tendo este segmento que cumprir funções de transmissão e receção, é necessário existir uma rotina para cada uma destas funcionalidades. Este segmento terá que comunicar com o segmento de solo através de uma ligação *Internet Protocol* (IP). Esta ligação apresenta uma exigência em termos de débito binário que importa quantificar. Como aproximação para o valor mínimo que a ligação deverá comportar, será considerada a transmissão digital não comprimida de um sinal originalmente na forma analógica. Inicialmente terá que ser calculada a taxa de amostras para a largura de banda aeronáutica. Para isso irá recorrer-se ao Critério de *Nyquist* que diz que

$$f_s = 2 * B, \quad (4.1)$$

onde f_s representa o número de amostras por segundo e B representa a largura de banda. Para o caso em estudo, a largura de banda será 8,33 kHz, como referido na Seção 2.4, logo obtém-se um valor de 16660 amostras por segundo. Com o objetivo de calcular o débito binário associado é assumido um valor de resolução (número de bits em cada amostra) de 16 bits (valor típico para transmissões de voz). Assim multiplicando os dois valores obtém-se o débito binário de 266560 bits por segundo, o que corresponde a um valor de 0,26656 Mbps. Sendo que o rádio pDDL900 tem uma disponibilidade de cerca de 4 Mbps (ver [34]) este factor não é limitador. De seguida o segmento solo irá ter rotinas implementadas de

desmodulação e modulação de sinal, para a receção e transmissão, respetivamente. Este diagrama está representado na Figura 4.1.

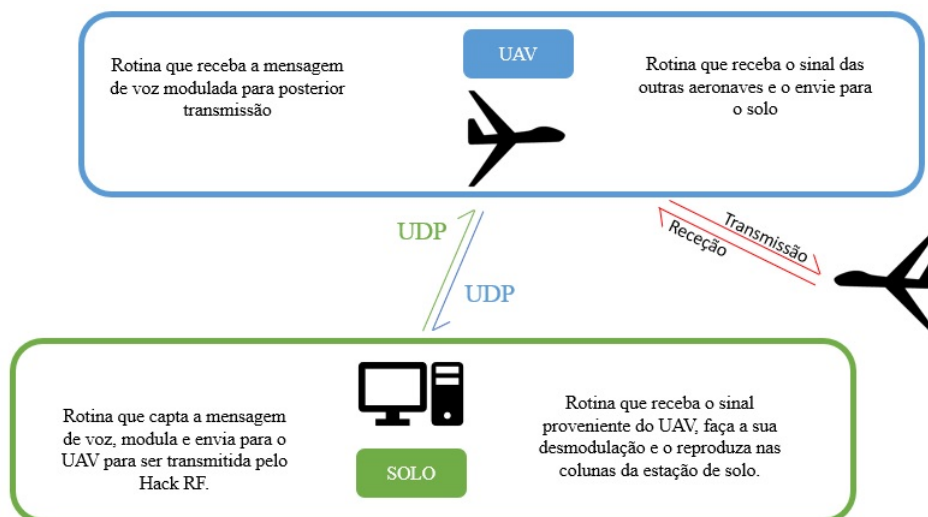


Figura 4.1: Arquitetura geral do sistema proposto.

A ligação representada a vermelho no diagrama 4.1, será feita na banda aeronáutica VHF e por isso será utilizada a **gama de frequências entre os 118 MHz e os 137 MHz**, como descrito na Subseção 2.1.1. No que diz respeito ao tipo de modulação das frequências esta será em *AM standard* como está previsto nos documentos legais para comunicações aeronáuticas nesta gama.

Através da análise da entrevista com o Major João Caetano (Anexo B, Questão 8), é possível compreender que é necessário que o **equipamento escolhido possua capacidade de receção e transmissão de sinal**. Neste âmbito existem 2 soluções que podem estar disponíveis, sendo elas a de *Half-Duplex* e a de *Full-Duplex*. A diferença entre elas prende-se com o facto de uma apenas permitir um modo de funcionamento isolado (*Half-Duplex*) e a outra permitir a utilização simultânea de ambos os modos de funcionamento (*Full-Duplex*). Dado que os rádios para comunicações aeronáuticas só funcionam em modo *Half-Duplex*, nesta dissertação não é essencial possuir a capacidade *Full-Duplex* pelo que apenas é **necessário ter capacidade *Half-Duplex***.

Relativamente aos ambientes de trabalho no solo e no UAV, existem alguns requisitos adicionais para garantir que a implementação é integrada corretamente. **O sistema operativo utilizado pelos operadores será uma distribuição *Linux***, apesar de ser **aconselhável ter compatibilidade também com o sistema operativo *Windows***. O *software* escolhido terá de utilizar uma **linguagem que facilite a integração de todos os componentes e rotinas**. Por fim, é aconselhável que a **interface para o utilizador seja acessível e de simples compreensão**.

4.1.2 Integração no UAV

O UAV considerado apresenta algumas limitações no que diz respeito à integração da solução a bordo, desta maneira irão ser apresentados alguns requisitos a ter em conta.

Sendo que são disponibilizados 100 Watts de energia no Antex X02 Extended e o consumo típico dos restantes sistemas é de 45 Watts, tem que ser considerado o consumo do dispositivo instalado de maneira a não pôr em risco a operação do UAV (ver [5]). Assim o **dispositivo não poderá ter um consumo superior a 25 Watts** para permitir algum intervalo de segurança.

Será necessário ter em conta o volume a integrar, como referido no Capítulo 3, pelo que o **valor máximo considerado será de $0,005m^3$** , tendo sempre em conta que as dimensões do dispositivo não podem ser maiores que as disponíveis na baía do UAV, identificadas na Secção 3.1.

Por fim é necessário ter em conta o **peso associado ao dispositivo instalado sendo que não deve exceder os 500 g** para que o peso total da aeronave à descolagem não ultrapasse os 25 kg e para não perturbar significativamente a posição do centro de gravidade da aeronave.

4.1.3 Telecomunicações

Numa perspetiva de transmissão e receção de sinais, um fator a ter em conta no domínio da propagação são as antenas a utilizar, visto que estas afetam as propriedades do sistema (alcance, área de cobertura). Como tal, é necessário perceber qual o objectivo da utilização do SDR para fazer uma escolha acertada da antena, visto que existem antenas diferenciadas para cada gama de frequências e a mesma antena não opera em todas as frequências. Assim, identificaram-se os principais tipos de antenas utilizados para comunicações aeronáuticas, dos quais foram considerados os seguintes:

- *Yagi*
- Monopolo
- Dipolo

As antenas *Yagi* têm como propósito serem utilizadas quando é necessário possuir valores de ganho relativamente elevados, possuem dimensões excessivas para serem instalados nos UAV e são directivas (é necessário estar a apontá-la para o UAV), portanto tendo em conta os objetivos de comunicação de voz a bordo este tipo de antena não é a mais viável.

Relativamente às restantes tipologias de antenas, estas possuem um diagrama de radiação semelhante, no entanto os dipolos apresentam um valor de ganho inferior aos dos monopolos. Apesar das antenas do tipo dipolo apresentarem o dobro da resistência de radiação, tornando-as mais eficientes, a antena do tipo monopolo possui uma instalação mais fácil. Outro factor a ter em conta é o de o tamanho da antena de um monopolo ser metade do tamanho de uma antena dipolo. Desta feita chegou-se à conclusão que

o tipo de antena a utilizar seria o monopolo. Para efetuar o seu dimensionamento é necessário ter em consideração parâmetros como a frequência de trabalho e também o facto de ser utilizada uma antena com um quarto de comprimento de onda. Assim será utilizada a fórmula

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (4.2)$$

onde λ é o comprimento de onda, c é a velocidade da luz ($\approx 3 * 10^8$ m/s) e f é a frequência de trabalho. Será assumida a frequência de trabalho mais baixa da banda VHF para comunicações de voz, 118 MHz, pois este será o valor que representa o valor mais alto de comprimento de onda. Após aplicar estes valores ficamos com um comprimento de onda de 2,54 m. No entanto, como referido anteriormente, é utilizado um quarto de comprimento de onda, logo ficamos com

$$\frac{\lambda}{4} = 0.635m, \quad (4.3)$$

ou seja, é **necessária uma antena com 0.635 metros de comprimento para efectuar as comunicações de voz pretendidas**. Analisando as dimensões da aeronave apresentadas na Secção 3.1 este valor é um valor aceitável para instalação.

Associado à escolha da antena é possível também calcular o alcance máximo estimado do sistema. Para analisar o alcance recorreu-se à fórmula de *Friis* (Fórmula 4.4), visto ser uma boa aproximação no âmbito desta dissertação de mestrado, uma vez que as atenuações associadas às comunicações são desprezadas.

$$\frac{P_r}{P_t} = G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2. \quad (4.4)$$

Nesta fórmula, P_r representa a potência disponível nos terminais de receção, P_t representa a potência de transmissão, G_T representa o ganho da antena de transmissão, G_R representa o ganho da antena de receção, λ é o comprimento de onda e R a distância. De notar que, nesta situação foram assumidos valores de ganho a 3 dB, apesar de este valor apenas se verificar para situações ideais. Estes valores foram assumidos uma vez que, pela análise da Figura 4.2, é possível perceber que as antenas de $\frac{1}{2}$ de comprimento de onda e de $\frac{1}{4}$ de comprimento de onda apresentam diagramas de radiação toroidais, existindo situações onde o ganho é ideal.

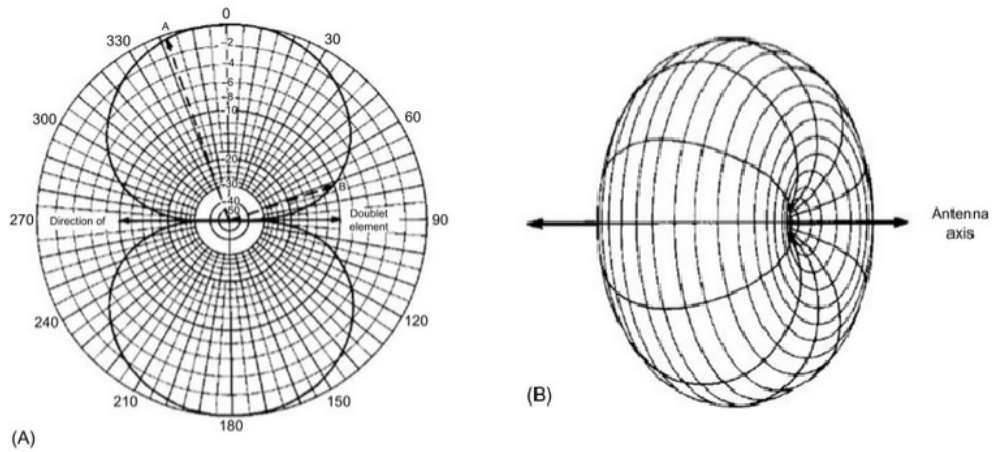


Figura 4.2: Diagrama de radiação de um dipolo genérico, adaptado de [4].

Iremos tomar como exemplo uma aeronave Epsilon-TB30 a uma altitude típica de 7000 pés (indicação de instruenos da Esquadra 101 - Roncos), ou seja, a utilização do rádio *Collins Aerospace VHF-22B*. Para calcular a variável R (distância) será utilizada a equação fornecida na entrevista com o Major João Caetano (Anexo B, Questão 7) de

$$R[km] = 3,57\sqrt{h[m]}, \quad (4.5)$$

onde h é a altitude. Foi assumido um valor de 7000 pés (=2133,6 m) de altitude, que resulta num valor de $R = 164,9$ km. De notar que será também utilizado o valor de 20 milhas náuticas (37 km) por sugestão dos operadores do UAV.

Para estimar a potência de transmissão mínima desejável do sistema SDR (de modo a aferir o alcance das comunicações com aeronaves tripuladas), tendo como base a equação de *Friis*, será assumido um valor de sensibilidade por parte do rádio VHF-22B de -70 dBm, que corresponde a um valor de 10^{-10} Watts (não foi possível identificar na especificação técnica do equipamento o valor da sensibilidade do receptor, tendo-se adotado um valor típico de referência), um valor de ganho para ambas as antenas de 3 dB, como referido anteriormente, e um valor de $\lambda = 2,54m$. Assim ficamos com um valor mínimo de potência de saída de: **i) para o alcance de 164,9 km de 17,64 Watts e ii) para o alcance de 37 km de 0,84 Watts**. As escalas de valores obtidos são de ordens de grandeza diferentes pelo que é possível optar, nas condições apresentadas, por um equipamento com potência disponível inferior a 1 Watt. Esta possibilidade representa um equipamento mais leve e mais acessível, quando comparado com um equipamento com cerca de 17 Watts de potência disponível de saída.

De uma forma resumida os requisitos podem definir-se pela Tabela 4.1.

	Desejável	Obrigatório
Frequência de trabalho na gama VHF (118 MHz a 137 MHz)		X
Ter capacidade <i>Half-Duplex</i>		X
<i>Software</i> com sistema operativo compatível com <i>Linux</i>		X
<i>Software</i> com sistema operativo compatível com <i>Windows</i>	X	
<i>Software</i> com linguagem que permite a integração de todos os componentes e rotinas		X
<i>Software</i> com interface acessível e de fácil compreensão para o utilizador	X	
Consumo máximo do SDR de 25 Watts		X
SDR com volume máximo de $0,005\text{ m}^3$		X
SDR com peso máximo de 500 g		X
Antena monopolo com 0,635 m de comprimento	X	
Alcance de 164,9 km (potência de transmissão $>17,64\text{W}$)	X	
Alcance de 37 km (potência de transmissão $>0,84\text{W}$)		X

Tabela 4.1: Tabela de requisitos definidos para a dissertação de mestrado.

4.2 Escolha do SDR

Nesta secção será concretizada a escolha do equipamento tendo como suporte os requisitos definidos na Secção 4.1. Tendo em conta que os equipamentos disponíveis foram analisados na Tabela 2.2 é possível eliminar os dispositivos *RTL-SDR 2832U*, *AirSpy R2* e *Funcube Pro+* por não terem capacidade de transmissão. De seguida o equipamento *BladeRF* não cumpre o requisito estabelecido de frequência de operação. Por fim, nenhum dos equipamentos cumpre com o mínimo de potência de saída disponível, no entanto, o dispositivo *Hack RF One* tem como propósito ser um dispositivo de teste. Este possui valores de potência de saída e de sensibilidade de curto alcance, podendo se necessário, ser acoplado a *hardware* adicional (amplificadores, filtros, antenas) para melhorar a sua performance. Desta feita irá optar-se pelo equipamento *HackRF One* (representado na Figura 4.3), pois apresenta o custo de aquisição mais baixo dentro da gama de equipamentos que cumpre os requisitos estabelecidos. De notar que o dispositivo *HackRF One* cumpre os requisitos de volume, pois apresenta um volume de $0,000192\text{m}^3$, e de peso, pois tem um peso de 201 g (ver [37]), estabelecidos na Secção 4.1.



Figura 4.3: Dispositivo *HackRF One*.

No que diz respeito ao *software*, após a análise efetuada na Subsecção 2.3.2, de acordo com os requisitos definidos pode-se chegar à decisão de optar pelo *software GNURadio Companion*. Esta decisão deveu-se

ao facto de este ter compatibilidade com o sistema operativo *Windows* e distribuição *Linux*, apresentar uma interface acessível para o utilizador e gerar código em *python* (linguagem com maior número de contribuições de acordo com a Figura 2.6).

4.3 Validação das Implementações

Nesta secção serão abordadas as implementações realizadas através do *GNURadio Companion*, com receção de sinal modulado em amplitude através do dispositivo *HackRF One* e consequente transmissão de sinais AM. Esta secção pretende validar todas as implementações, culminando na validação das duas implementações utilizadas na dissertação de mestrado, de receção e transmissão de sinais modulados em amplitude para possibilitar a comunicação do UAV com os dispositivos presentes no seu ambiente circundante.

É possível ainda consultar através dos anexos C e D a informação relativa à implementação para receção e emissão de sinais FM e ainda uma implementação para receção de sinal AM utilizando o dispositivo *RTL-SDR 2832U*. As implementações em FM encontram-se em anexo pois, no âmbito deste trabalho, a modulação em fase não é utilizada tendo sido aplicadas para familiarização com o *software*.

4.3.1 Implementação para receção AM

A receção AM será uma das bases do sistema pretendido para instalar no UAV, desta feita é importante efetuar a sua validação antes de a colocar em utilização.

A implementação é baseada na utilização do dispositivo *HackRF One* visto que este será o equipamento do projeto final a instalar no UAV.

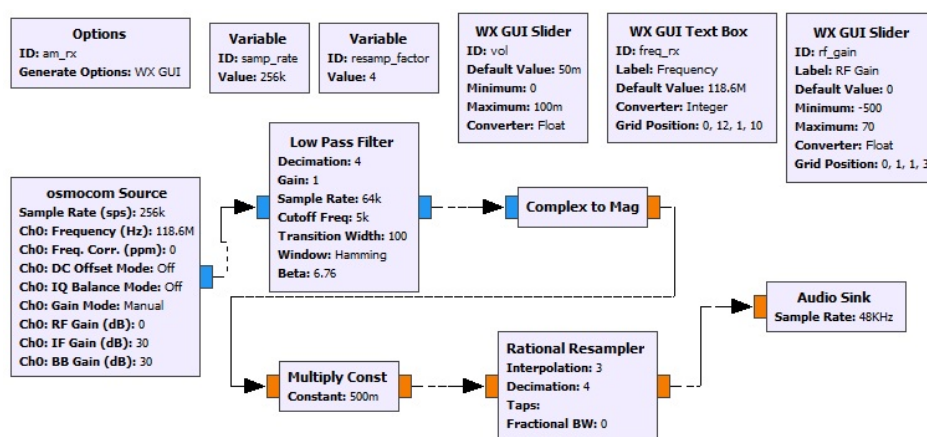


Figura 4.4: Esquema da implementação de um recetor AM através de um *HackRF One*.

O *software GNU Radio Companion* permite a implementação de blocos funcionais de código e interligá-

los de forma gráfica, conforme apresentado na Figura 4.4.

A implementação para receção do sinal AM necessita de ter algumas variáveis definidas, nomeadamente as variáveis de *samp_rate*, *resamp_factor*, *vol*, *freq* e *rf_gain*.

- *samp_rate* - representa a quantidade de amostras de um sinal analógico, recolhidas num determinado período de tempo;
- *resamp_factor* - variável que irá mudar a taxa de amostragem em determinado local no circuito. Normalmente costuma ser a *samp_rate* dividida por um factor;
- *vol* - representa o volume do sinal, sendo traduzido numa variável de multiplicação do sinal;
- *freq* - representa a frequência de trabalho pretendida;
- *rf_gain* - representa o valor de ganho do sinal RF que se pretende associar, a grandeza desta variável é em dB.

O primeiro bloco da Figura 4.4 a ser utilizado será o bloco de receção do sinal, que será do tipo **osmocom Source**, onde será aplicada a variável de taxa de amostragem com 256 mil amostras por segundo (*samp_rate*), com a frequência desejada sintonizada (*freq*) e com o valor de ganho inicialmente a 0 dB mas passível de mudança durante a utilização (*rf_gain*). De seguida, o sinal necessita de ser filtrado para obter apenas a quantidade de amostras necessárias para maximizar a potência do sinal, para existir esta filtragem utiliza-se o bloco **Low Pass Filter** com um valor de divisão da taxa de amostragem de 4 (*decimation*) que faz com que a taxa de amostragem fique nas 64 mil amostras por segundo. Após fazer esta filtragem o sinal (considerando uma frequência de corte de 5 kHz, típica dos sinais de voz), que até agora era complexo, necessita de uma mudança para real (apesar dos números complexos serem úteis no cálculo, para efectuar as colunas são utilizadas as tensões/correntes que são valores reais) assim é aplicado o bloco **Complex to Mag** que calcula a magnitude de valores complexos. Seguidamente é aplicado um bloco de **Multiply Const** que efectua a multiplicação e tem como variável o volume, controlável durante a utilização (*vol*), posteriormente é necessário adaptar a taxa de amostras do sinal à saída das colunas do computador recorrendo-se então ao **Rational Resampler**, com os parâmetros de *Interpolation* e *Decimation* com os valores 3 e 4 respectivamente, para obter os 48 kHz (frequência normalmente utilizada pelas placas de som dos computadores) de taxa de amostras. Por fim, após ter o sinal filtrado e adaptado ao pretendido é utilizado o bloco **Audio Sink** para poder conectar o sinal às colunas do computador e efectuar a sua reprodução, com os 48 kHz de taxa de amostragem.

4.3.2 Implementação para emissão AM

Após garantir o funcionamento da implementação de receção de sinal é necessário validar a de emissão de sinal AM. Este processo é fundamental para obter um sistema compatível com os objectivos delineados

para esta dissertação de mestrado. Foi então desenvolvido um diagrama de blocos para emissão de sinal AM, presente na Figura 4.5.

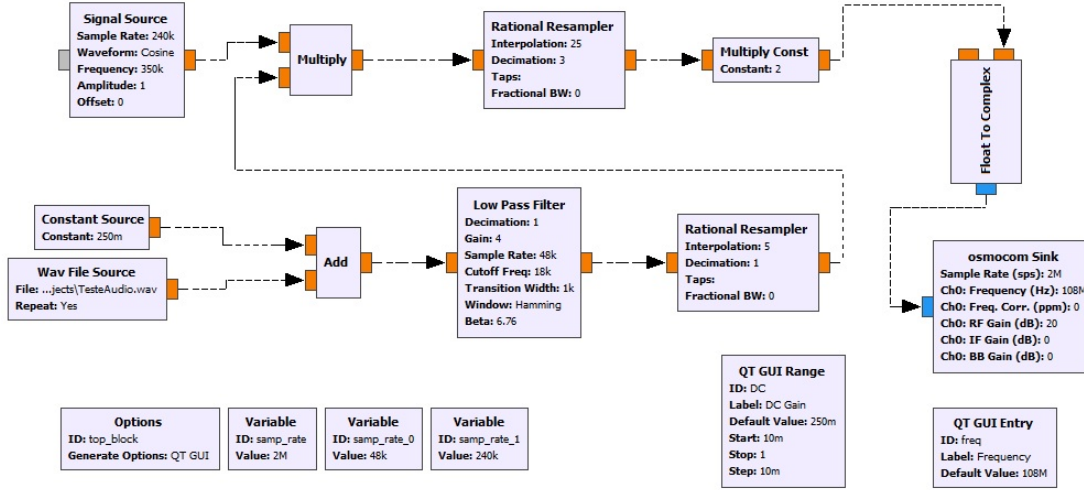


Figura 4.5: Esquema da implementação de um emissor AM através de um *HackRF One*.

Esta implementação, representada na Figura 4.5, constitui-se como a segunda parte do sistema final, sendo a que possibilita a transmissão de informação via voz para outras aeronaves. Inicialmente é utilizado o bloco de **Wav File Source** (que permite a utilização de um ficheiro de áudio), que substitui o bloco de **Audio Source** para efeitos de testes. De seguida é utilizado um filtro passa baixo para filtrar apenas a informação desejada, sendo que este bloco, **Low Pass Filter**, tem como parâmetros uma taxa de amostras de 48 kHz (compatível com o sinal obtido pelo microfone), um valor de *decimation* de 1 e de ganho de 4. Após fazer a filtragem é utilizado um bloco para mudar a taxa de amostras do sinal, o **Rational Resampler** com valores de *interpolation* de 5 e *decimation* de 1, ficando com uma taxa de amostras de 240 kHz ($48kHz * 5 = 240kHz$). De seguida o sinal tem de ser multiplicado pela portadora (bloco **Signal Source**), com uma onda do tipo coseno com valor de amplitude 1. Após fazer a multiplicação o sinal terá que ser sujeito a uma alteração na taxa de amostragem para poder ser transmitido corretamente, assim é utilizado novamente o bloco **Rational Resampler** com uma multiplicação de 25 e divisão de 3 para obter uma taxa de amostragem final de 2 milhões de amostras por segundo. Seguidamente, o sinal é multiplicado pela variável *Volume* para melhor controlar a saída do sinal, sendo de seguida transformado de um *float* para *complex*, através do bloco **Float to Complex**, pois os sinais são transmitidos e recebidos em *complex* pelo *GNURadio Companion*. Desta feita já é possível ligar o sinal ao bloco **osmocom Sink** para fazer a transmissão do mesmo na frequência desejada, ajustável através do bloco **WX GUI Text Box** que permite colocar a frequência durante o processo de transmissão.

Esta implementação é validada e recebida pela implementação referida na Subsecção 4.3.1, instalada

num dispositivo *RaspberryPi* com o *software GNURadio Companion* através do equipamento *HackRF One*.

4.4 Diagrama do Sistema

Após analisar o diagrama apresentado na Figura 4.6 será necessário estudar qual o método para enviar e receber dados entre o UAV e a GS. O *GNU Radio Companion* oferece dois tipos de blocos que permitem o envio de dados via IP são eles os blocos de UDP e de TCP. Para definir qual dos dois será utilizado terá que ser feita uma análise a ambos os protocolos.

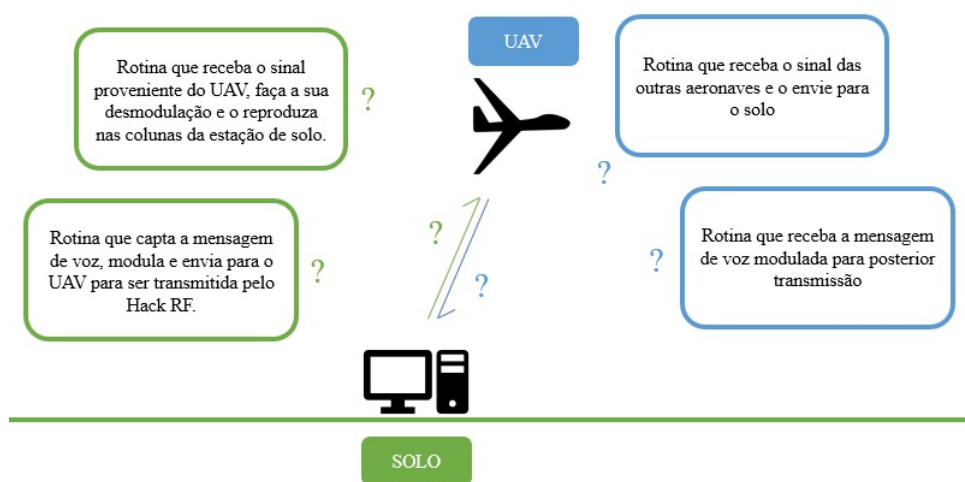


Figura 4.6: Diagrama do sistema a implementar, primeira versão.

O UDP é um protocolo de transmissão e receção de dados via IP que utiliza duas componentes para efetuar essa comunicação, estes são o endereço do servidor e o porto a utilizar. Existem portos pré-definidos para este protocolo em todos os computadores e podem ser alocados a qualquer processo desejado. O princípio de funcionamento do UDP é enviar os dados pretendidos em pacotes de tamanho definido pelo utilizador para o servidor desejado. A característica diferenciadora deste protocolo é o facto de não existir garantia de entrega de informação. Assim não existe verificação da informação quando esta é recebida, logo a que foi enviada pode não corresponder totalmente à recebida. Este tipo de protocolo é útil em situações de transmissões ao vivo onde é preferível perder alguma informação do que parar a transmissão por completo.

Relativamente ao TCP, também é um protocolo de envio e receção de dados, via IP, com portos dedicados no computador, sendo necessário definir o endereço do servidor de destino. No que diz respeito ao TCP existe um protocolo de acordo de três vias (SYN, SYN-ACK, ACK) para garantir que não existiram perdas no pacote enviado (ver [11]). Este processo está demonstrado na Figura 4.7, onde *Client*

retrata o utilizador que envia os dados e *Server* o que recebe.

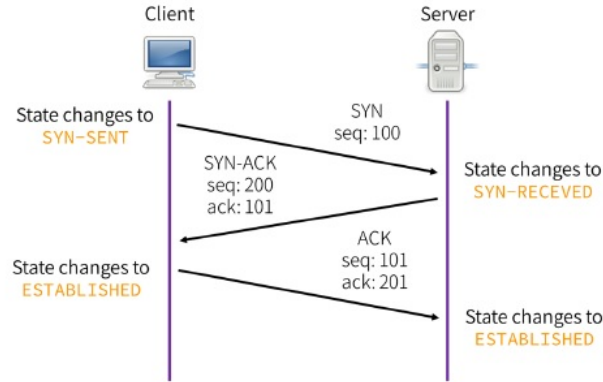


Figura 4.7: Acordo de três vias, utilizado pelo TCP, adaptado de [11].

Tendo em conta o estudo realizado, sabendo que o objetivo proposto é efectuar comunicações de voz em tempo real, o protocolo seleccionado será o UDP. Apesar de não garantir a entrega de todos os pacotes, a transmissão acontece de uma forma fluída e sem paragens.

Considerando as implementações validadas no Capítulo 4.3, terão que ser definidas implementações em *GNU Radio Companion* que cumpram os pressupostos da Figura 4.6. Começando pela receção de sinal, será necessário que o *hardware* instalado no UAV (*Hack RF One*) faça a captação do sinal e o envie para a GS. Para isso será utilizada a implementação denominada de **uav_rx.py**, apresentada na Figura 4.8. O princípio de funcionamento consiste em aplicar o bloco **osmocom Source**, já validado na Subsecção 4.3.1, e um bloco **UDP Sink** que recebe como argumentos o IP de destino e a porta UDP pretendida.

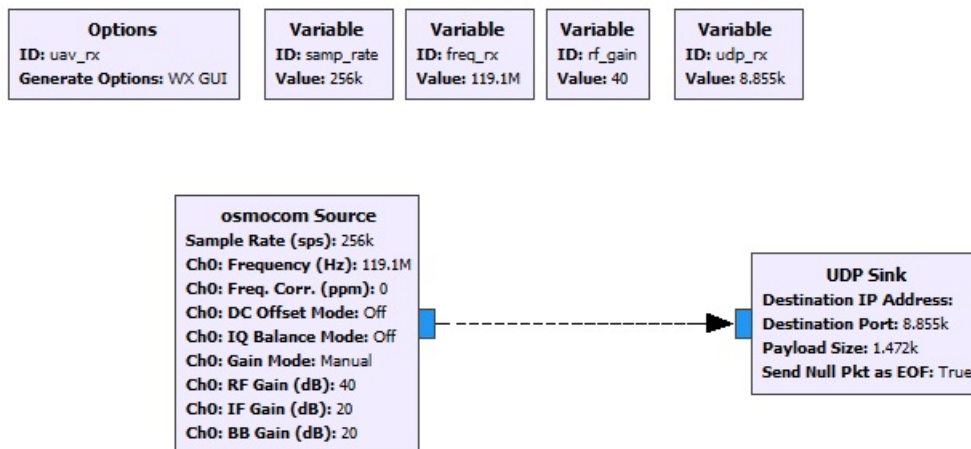


Figura 4.8: Implementação em *GNU Radio Companion* para receção de sinal no UAV.

De seguida, o sinal terá que ser recebido pela GS e consequentemente desmodulado, para isso poderá ser utilizada a implementação validada na Subsecção 4.3.1 com exceção do bloco **osmocom Source** que foi utilizado no UAV. Desta feita, o bloco de origem será o bloco **UDP Source** que recebe a informação enviada pelo bloco **UDP Sink** presente na implementação **uav_rx.py**, na porta estabelecida. Esta implementação está demonstrada na Figura 4.9 e é denominada de **ground_rx.py**.

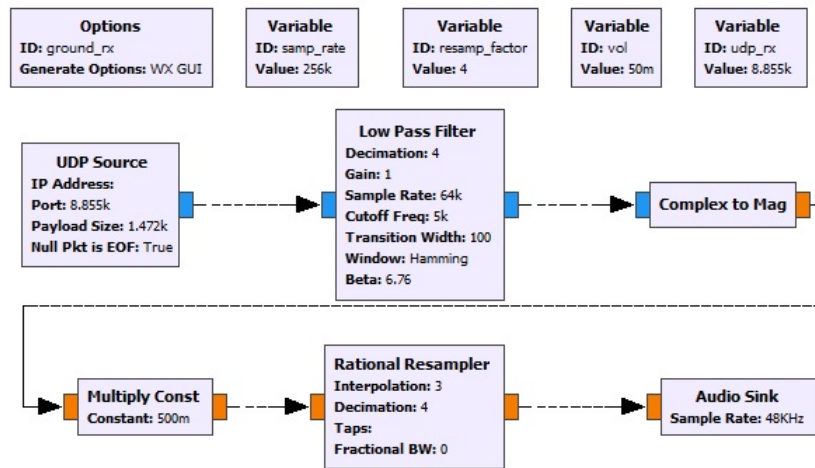


Figura 4.9: Implementação em *GNU Radio Companion* para receção de sinal na GS.

Analisando agora a componente de transmissão, o primeiro passo será captar a mensagem de voz do operador e modulá-la culminando no envio para o UAV para esta ser transmitida, assim será aplicada a implementação validada na Subsecção 4.3.2. A diferença relativamente à implementação mencionada previamente é o facto de esta terminar, não com o bloco **osmocom Sink**, mas sim com o bloco **UDP Sink**, possibilitando o envio da informação para o servidor pretendido. Esta implementação é denominada de **ground_tx.py** e está demonstrada na Figura 4.10.

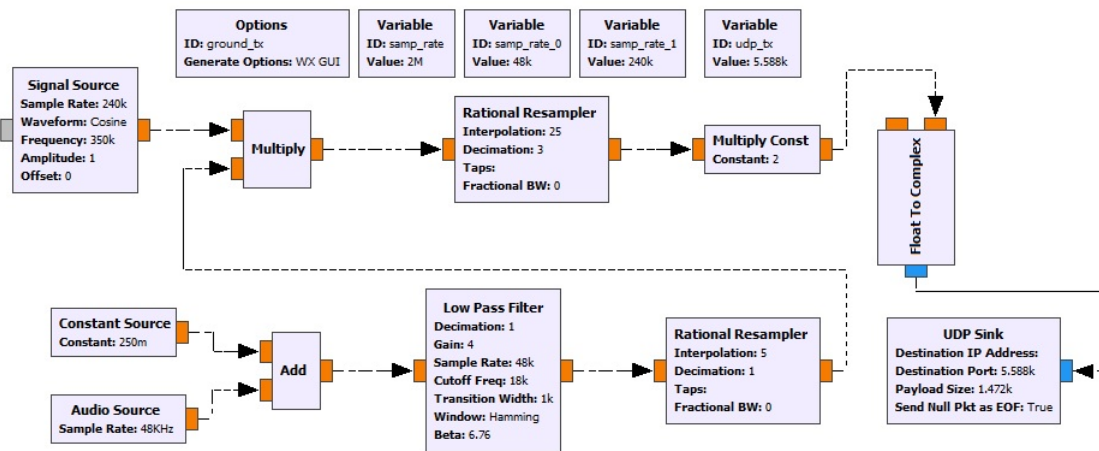


Figura 4.10: Implementação em *GNU Radio Companion* para transmissão de sinal na GS.

4.5 Desenvolvimento da Interface

Após concluir o diagrama da implementação é necessário que esta possa ser utilizada de forma intuitiva pelo operador. Assim será desenvolvida uma interface gráfica que permita a interação com o operador e que relacione todas as funções supra-mencionadas bem como os parâmetros necessários. Por forma a facilitar a integração da interface com os ficheiros das funções, a interface será desenvolvida em linguagem *python* com recurso ao pacote *PySimpleGUI*27. Este pacote permite criar *Graphical User Interfaces* (GUIs) onde se podem conceder funcionalidades a botões, *inputs* de texto, entre outros (ver [26]).

Para iniciar a implementação da interface terá que ser tido em conta que, é necessário criar um meio de transmitir mensagens de texto entre a GS e o UAV, pois só assim será possível passar parâmetros e seleccionar o modo de operação do *HackRF One* (transmissão ou receção). Esta troca de mensagens é feita com recurso ao protocolo TCP, criando uma conexão em tempo real. Nesta situação o ideal é utilizar o protocolo TCP, visto que se pretende garantir que um determinado parâmetro ou modo de operação é correctamente recebido pelo UAV.

Após estabelecer a ligação entre GS e UAV é necessário avaliar quais as opções disponíveis para o utilizador. Desta forma, e com base na missão e necessidades identificadas na entrevista ao Major João Caetano (Anexo B, Questão 4), percebeu-se que seria necessário existir mudança de frequência durante a utilização do sistema. Outra necessidade é o valor de ganho da transmissão de sinal do rádio. Tendo estes dois parâmetros identificados o próximo requisito é a capacidade de comutação entre o modo de transmissão e de receção. Assim, a estratégia que se encontrou para efetuar esta selecção reside na escolha da quantidade de tempo que se pretende realizar essa acção. Tendo em conta que não foi possível chegar a uma solução que fizesse a troca automática entre os dois modos, utilizou-se a solução do tempo para poder provar o conceito.

Com todas as opções estabelecidas e após programar as rotinas do servidor e do cliente é possível apresentar a janela, presente na Figura 4.13, ao operador.

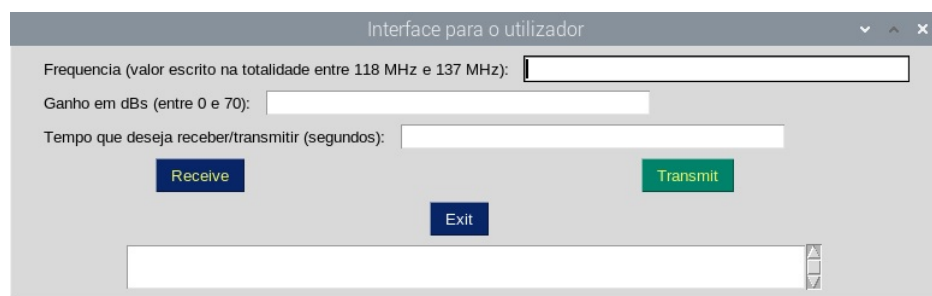


Figura 4.13: Janela da interface para o utilizador.

Esta interface possui algumas características a ressaltar, sendo enunciadas em seguida:

- A interface possui três caixas de texto, onde é possível colocar valores;

- Não é possível selecionar um modo de funcionamento se o valor da frequência não estiver dentro do intervalo definido (118 MHz - 137 MHz);
- Não é possível selecionar um modo de funcionamento se o valor de ganho estiver fora do intervalo indicado (0 - 70);
- A caixa de texto relativa ao tempo não pode estar vazia, para selecionar um modo;
- A interface possui uma caixa de texto que indica ao utilizador se não preencheu os valores adequadamente.

5

Avaliação

Neste capítulo será abordada a fase de testes do sistema explanado no Capítulo 4, sendo que inicialmente será exposto o planeamento da simulação de uma situação real, sendo de seguida escolhidos os critérios a serem avaliados durante os testes, para garantir o correto funcionamento da implementação. Por fim serão apresentados os resultados a esses mesmos testes.

5.1 Configuração para Teste

A montagem para testar o sistema na sua plenitude deverá simular uma situação de operação do UAV. Deste modo, será necessário garantir a existência de uma estação para simular a GS e de outra para simular o UAV. Estas estações serão implementadas recorrendo a placas *Raspberry Pi 3*, que apesar de não terem o mesmo desempenho dos sistemas reais, permitem simular o seu funcionamento. Para isto, foram dispostos dois dispositivos ligados entre eles através de cabo *ethernet* (simulando a conexão via IP presente entre o UAV e GS) como ilustrado na Figura 5.1.

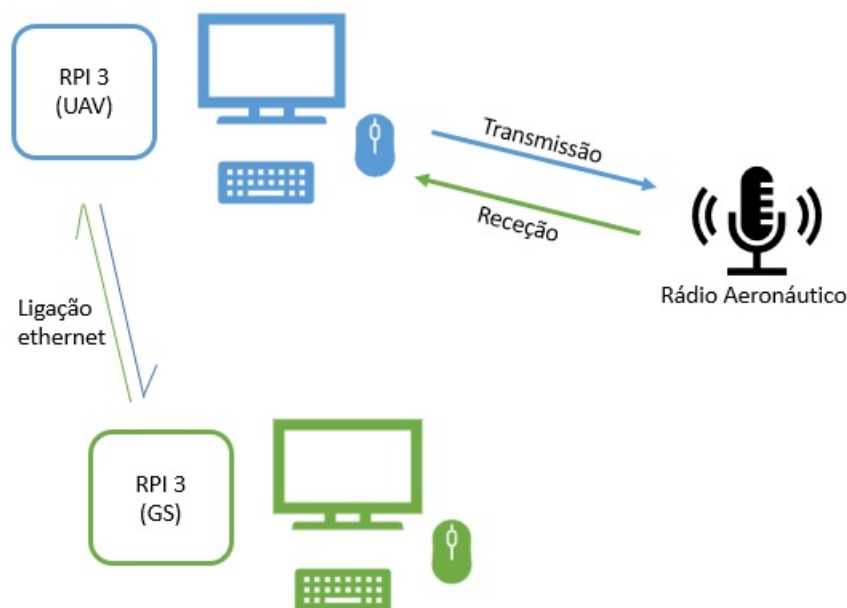


Figura 5.1: Sistema testado que simula o cenário real.

Seguidamente, foi executado o *script* de servidor na estação de simulação do UAV e o *script* de cliente na estação de simulação da GS, garantindo a sua conexão.

Por forma a simular a existência de outra aeronave na área de operação do UAV será empregue um rádio de comunicações aeronáuticas, o rádio ICOM IC-A16E VHF Portable Airband, representado na Figura 5.2, para poder garantir a receção e transmissão de voz.



Figura 5.2: Rádio aeronáutico utilizado nos testes ao sistema.

5.2 Critérios de Avaliação

Nesta secção será abordada a definição dos critérios para avaliação de funcionamento do sistema. Estes critérios foram definidos de acordo com as necessidades operacionais que foram identificadas na entrevista ao Major Caetano (Anexo B) e a avaliação irá contemplar os diferentes modos de funcionamento do sistema. De referir que esta fase de avaliação foi precedida de uma fase de testes preliminares, onde primeiramente os componentes foram testados parcelarmente e de seguida foi verificado o funcionamento do sistema completo.

Com o sistema funcional o próximo passo será garantir o funcionamento das duas principais componentes da implementação, iniciando com a receção e posteriormente a transmissão. No entanto tem que ser definidos critérios para tornar os resultados objetivos, desta feita foram definidas três frequências onde seria testada a receção de sinal. Como abordado na Secção 2.1, a gama de frequências explorada é a VHF, situando-se entre os 118 MHz e os 137 MHz. Assim escolheram-se as frequências próximas das frequências limite 118 MHz e 137 MHz, optando pela última numa frequência intermédia, próxima dos 128 MHz. Para realizar os testes, primeiro verificou-se que as frequências seleccionadas não estavam atribuídas na zona envolvente da Base Aérea 1 e como tal, a probabilidade de ter causado perturbação ao tráfego aéreo é muito reduzida.

Para poder avaliar a qualidade da receção e transmissão, será utilizado o sistema em uso nas Forças Armadas, para aferir as condições de receção de áudio. Este sistema de classificação pode ser consultado na Tabela 5.1.

Relato de Intensidade	Relato de Legibilidade
Forte	Claro
Bom	Legível
Fraco	Distorcido
Muito Fraco	Com Interferência
Com Desvanecimento	Intermitente

Tabela 5.1: Tabela de avaliação de condições de áudio, adaptada de [17].

Consultando a tabela apresentada, será possível classificar a comunicação de uma forma mais objetiva e obter resultados com os quais se possa avaliar a implementação final obtida e a viabilidade da solução apresentada.

Após avaliar o funcionamento das duas componentes do sistema, o próximo passo será confirmar que ambos conseguem ser utilizados de forma consecutiva e sem dificuldades inesperadas. Este critério será avaliado pela utilização do sistema na frequência de 118 MHz na função de receção e de seguida efetuar uma transmissão nessa mesma frequência (e vice-versa), sendo este processo auxiliado pelo rádio aeronáutico mencionado anteriormente.

Seguidamente a próxima função a testar será a troca de frequência enquanto se realiza a receção de sinal, trocando entre as frequências validadas anteriormente. O mesmo processo será realizado também para a componente de transmissão.

Visto que o teste é realizado na Academia da Força Aérea (AFA) no Laboratório Aeronáutico (LABAER), escolheu-se como teste constatar se o sistema desenvolvido seria capaz de captar comunicações provenientes da frequência 118.6 MHz (*Sintra Approach*). Neste teste não foi verificado o modo de transmissão, uma vez que esta frequência é efetivamente utilizada para prestar um serviço de controlo de tráfego aéreo.

Em seguida está presente a Tabela 5.2 que resume todos os testes realizados ao sistema.

	Teste a realizar
Teste 1	Receção nas frequências: - 118 MHz - 128 MHz - 137 MHz
Teste 2	Transmissão nas frequências: - 118 MHz - 128 MHz - 137 MHz
Teste 3	Utilização de receção seguida de transmissão na frequência de 118 MHz
Teste 4	Utilização de transmissão seguida de receção na frequência de 118 MHz
Teste 5	Troca de frequência a meio de uma utilização de receção, passando de 118 MHz para 128 MHz
Teste 6	Troca de frequência a meio de uma utilização de transmissão, passando de 118 MHz para 128 MHz
Teste 7	Receção de comunicações da frequência 118.6 MHz (<i>Sintra Approach</i>)

Tabela 5.2: Tabela com os testes a realizar ao sistema.

5.3 Resultados

Nesta secção serão analisados os resultados que o sistema obteve aos testes mencionados anteriormente. Estes resultados irão avaliar o sistema desenvolvido em todas as suas vertentes.

Inicialmente começou por se realizar o Teste 1, sendo que se fez uso do rádio aeronáutico ICOM IC-A16E, referido anteriormente. Foi possível confirmar a receção de sinal nas frequências de 118 MHz, 128 MHz e 137 MHz. O sinal foi qualificado segundo a Tabela 5.1, obtendo uma qualificação de **BOM** e **LEGÍVEL** para todas as frequências. O teste foi realizado a várias distâncias para garantir que este não estaria a ser influenciado por factores externos à comunicação, sendo a distância mínima de 10 m e máxima de 100 m. Este primeiro teste de receção está ilustrado na Figura 5.3.

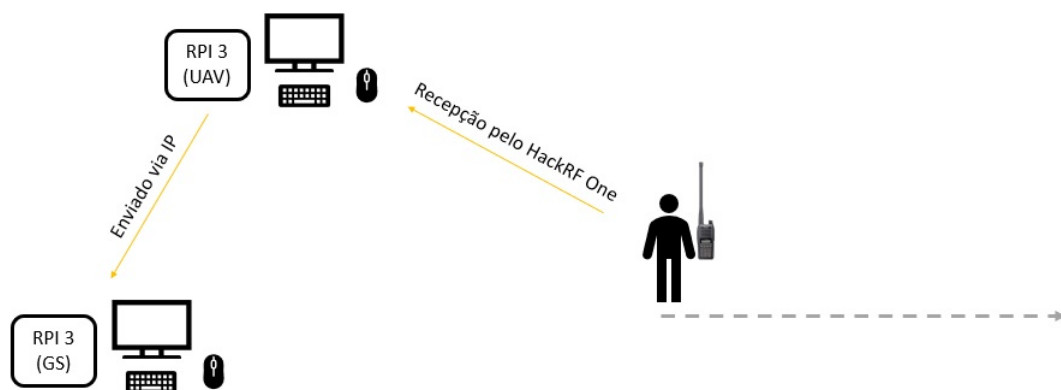


Figura 5.3: Ilustração do teste realizado à receção.

No Teste 2 pretendia-se avaliar a capacidade de transmissão através da implementação. Para isso foi novamente utilizado o rádio aeronáutico sendo que desta vez seria o rádio aeronáutico a receber a comunicação. As frequências testadas foram as mesmas da recepção e obteve-se o mesmo resultado nas três, utilizando a Tabela 5.1 classifica-se a transmissão como um sinal **MUITO FRACO** e **INTERMITENTE**. É possível perceber que existe uma transmissão naquela frequência, porém não é legível. Este resultado pode dever-se a vários fatores, desde a falta de capacidade de processamento do *Raspberry Pi 3* que bloqueia o processo e a transmissão não se mantém fluída até a correções que sejam necessárias de efetuar na implementação em *GNURadio Companion*. Foi selecionada a placa *Raspberry Pi 3* visto que a placa computacional *Jetson TX2* não possui assistente de instalação, tornando a sua utilização complexa. A esquemática deste teste está representada na Figura 5.4.

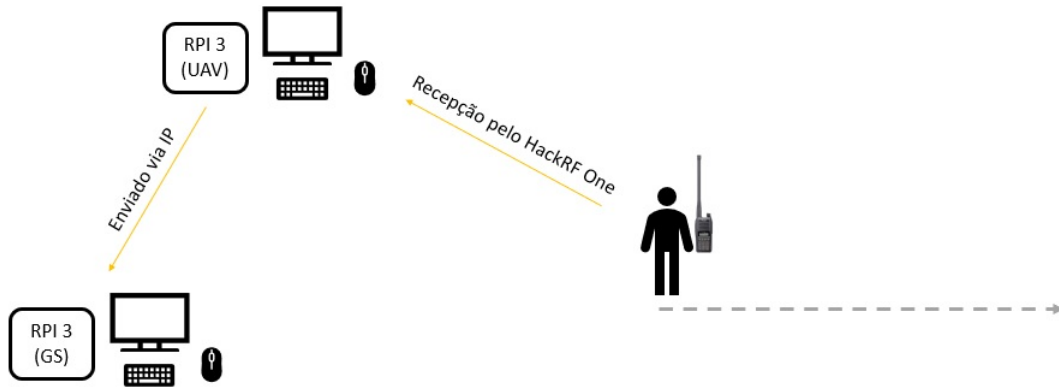


Figura 5.4: Ilustração do teste realizado à transmissão.

De seguida é realizado o Teste 3 e Teste 4 através da junção dos dois testes anteriores. Com o sistema em funcionamento existe uma comutação de modo, sempre na frequência de 118 MHz. Para este teste os resultados obtidos foram coerentes com os obtidos nos dois testes anteriores, sendo que a receção teve um resultado **BOM** e **LEGÍVEL** e a transmissão um resultado **MUITO FRACO** e **INTERMITENTE**. O processo inverso também foi realizado, iniciando com transmissão e de seguida receção, sendo que os resultados foram os mesmos. De notar que a troca de modo é realizada com recurso a um temporizador, conforme descrito na Secção 4.5, logo teria que se aguardar que o tempo seleccionado terminasse. A esquemática do teste realizado encontra-se na Figura 5.5.

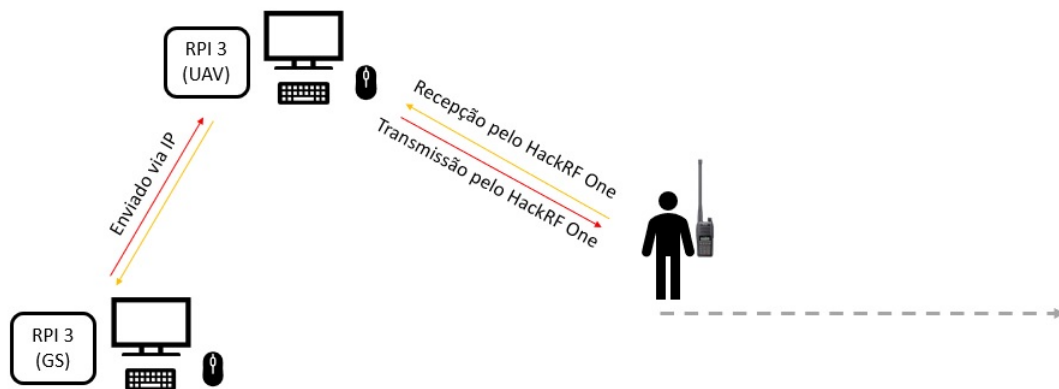


Figura 5.5: Ilustração do teste realizado à transmissão seguida de receção e vice-versa.

Seguidamente é efectuado o Teste 5 (receção) e o Teste 6 (transmissão). Para isto foram seleccionadas as frequências de 118 MHz e 128 MHz e o resultado obtido para a receção do sinal manteve-se no **BOM** e **LEGÍVEL**, bem como a transmissão se manteve no **MUITO FRACO** e **INTERMITENTE**. Desta

feita validou-se a implementação da troca de frequência durante a utilização de um modo.

Por fim procedeu-se ao Teste 7, testando a capacidade de receção na frequência 118.6 MHz que pertence à *Sintra Approach*. Para realizar este teste colocou-se o sistema no modo de receção e aguardou-se que existisse alguma comunicação na frequência. Foi possível constatar que a implementação captou a comunicação por parte da *Sintra Approach* classificando-a, através da Tabela 5.1 como **BOM** e **LEGÍVEL**. O teste está representado na Figura 5.6.



Figura 5.6: Ilustração do teste realizado à recepção de comunicações da *Sintra Approach*.

Os testes realizados e os respetivos resultados encontram-se descritos na Tabela 5.3.

Teste Realizado	Resultado
Teste 1	BOM / LEGÍVEL
Teste 2	MUITO FRACO / INTERMITENTE
Teste 3	Receção - BOM / LEGÍVEL Transmissão - MUITO FRACO / INTERMITENTE
Teste 4	Receção - BOM / LEGÍVEL Transmissão - MUITO FRACO / INTERMITENTE
Teste 5	BOM / LEGÍVEL
Teste 6	MUITO FRACO / INTERMITENTE
Teste 7	BOM / LEGÍVEL

Tabela 5.3: Tabela com os resultados aos testes realizados ao sistema.

6

Conclusão

6.1 Trabalho Realizado

Esta tese propunha-se a desenvolver uma ferramenta que permita a comunicação de voz, em banda aeronáutica, entre operadores e restantes aeronaves e GS (ver Capítulo 1).

Numa primeira fase foram estudadas as comunicações aeronáuticas e o respetivo enquadramento. Após efetuar este estudo foram analisadas as soluções disponíveis no mercado, culminando com a exploração do tema dos SDR. No Capítulo 2 foram também abordados conceitos de telecomunicações que permitiram caracterizar o tipo de modulação utilizado nas comunicações aeronáuticas.

Seguidamente, abordaram-se as propriedades físicas do UAV Antex X02 Alfa Extended, bem como uma análise dos sistemas com uma perspectiva detalhada da sua arquitetura geral. Através desta abordagem foi possível definir os requisitos necessários para o sistema, tendo em conta as limitações do UAV, a arquitetura geral do sistema e os conceitos teóricos de telecomunicações. Estes requisitos permitiram selecionar o dispositivo de *hardware* - *Hack RF One* - e o *software* - *GNURadio Companion* - a utilizar. De seguida foi desenvolvido o sistema a implementar, que permitia a comunicação entre a componente solo (GS) e a componente ar (UAV), com as rotinas independentes para os modos de transmissão e receção. Por fim foi desenvolvida a interface que permite integrar as diferentes funcionalidades desenvolvidas num sistema integrado.

Numa última fase foram realizados testes ao sistema integrado para efetuar a sua avaliação. Esta fase de testes permitiu validar a utilização do sistema de receção de comunicações de voz, no entanto, a componente de transmissão apresenta lacunas na qualidade do sinal. Alguns fatores que podem ter contribuído para este resultado foram a capacidade de processamento do *Raspberry Pi 3* não ser suficiente para realizar a transmissão ou a potência de saída não ser suficientemente alta para ser capaz de transmitir mensagens (como mencionado na Subsecção 4.2). Contudo, foi possível validar a implementação de mudança de frequência e de mudança de modo de funcionamento do sistema, recorrendo a um temporizador.

Concluindo, este trabalho possibilitou o estudo, implementação e validação de uma solução, de baixo custo, de comunicações aeronáuticas para a aeronave ANTEX-X02 Extended. O sistema encontra-se ainda na fase de protótipo, sendo ainda necessário explorar alguns desenvolvimentos adicionais, descritos em seguida.

6.2 Trabalho Futuro

O trabalho realizado nesta dissertação de mestrado proporcionou algumas oportunidades de trabalho futuro.

Em primeiro lugar, seria relevante melhorar a capacidade de transmissão do sistema, através da utilização de placas computacionais com maior capacidade de processamento e instalação de amplificadores

no equipamento *HackRF One*. Tipicamente, o equipamento *HackRF One* tem como propósito ser um dispositivo de testes de bancada, estando limitado a um máximo de 15 dBm (0,03 W) de potência de saída. Para poder atingir o valor pretendido de 0,84 seria necessário um incremento de 14,9 dBm. Tendo este valor em vista pode ser adquirido o equipamento LaNA que é um amplificador de baixo ruído e banda larga. Este equipamento pode fornecer, na gama de frequências pretendida (118 MHz - 137 MHz), um incremento de potência de saída de aproximadamente 15 dBm (fazendo um total de 30 dBm - 1 Watt), cumprindo assim o requisito definido (ver [20]).

Em segundo lugar, seria pertinente melhorar o método de comuta de modos de funcionamento do sistema, visto que o método empregue (escolha do tempo pretendido, em segundos) não é compatível com a operação da aeronave. Idealmente, como identificado na entrevista ao Major Caetano (Anexo B, Questão 10), o método a utilizar seria um botão *Press To Talk* (PTT) com *headset*.

Por último, os testes realizados utilizaram uma configuração equivalente à real, assim, seria indicado adaptar a implementação à interface utilizada pelos operadores e instalar o sistema no UAV Antex X02 Extended, refazendo os testes.

Bibliografia

- [1] ANACOM. *Quadro Nacional de Atribuição de Frequências*. Disponível em https://www.anacom.pt/streaming/QNAF2018vgrafica.pdf?contentId=1497661&field=ATTACHED_FILE, 2018.
- [2] AIRSPY. *The Ultimate VHF/UHF RX “Brick”*. Disponível em <https://airspy.com/airspy-r2/>.
- [3] ANAC. *Guia de Utilização do Espaço Aéreo*. Disponível em <https://www.voanaboa.pt/Files/downloads/Guia-Utilizacao-Espaco-Aereo.pdf>.
- [4] BENSKY, A. *Short-range wireless communication*. Newnes, 2019.
- [5] BERNARDINO, A., CRUZ, G., FERREIRA, N., BATISTA, R., FERREIRA, S., AND OLIVEIRA, T. SEAGULL - Sistemas Inteligentes de Suporte ao CSM baseados em VANTs. Critical Software S.A.
- [6] EPIQ SOLUTIONS. *matchstiq S-Series*. Disponível em <https://epiqsolutions.com/static/Epiq-Solutions-Matchstiq-S-series-7c7ecfb2aabb20bee913523bf28444d1.pdf>.
- [7] ETTUS RESEARCH. *USRP E312 Datasheet*. Disponível em https://www.ettus.com/wp-content/uploads/2019/01/USRP_E312.Datasheet.pdf.
- [8] EUROCONTROL. *L-band digital aeronautical communication system*. Disponível em <https://www.eurocontrol.int/system/l-band-digital-aeronautical-communication-system>.
- [9] FUNCUBE DONGLE. *Funcube Dongle*. Disponível em http://www.funcubedongle.com/?page_id=1201, 2012.
- [10] GITHUB. *GitHub*. Disponível em <https://github.com/>, 2020.
- [11] HSU, F., HWANG, Y., TSAI, C., CAI, W., LEE, C., AND CHANG, K. *TRAP: A three-way handshake server for TCP connection establishment*. *Applied Sciences* 6, 11 (2016), 358.
- [12] ICAO. *About ICAO*. Disponível em <https://www.icao.int/about-icao/Pages/default.aspx>.

- [13] MACHADO-FERNÁNDEZ, J. R. Software defined radio: Basic principles and applications. *Revista Facultad de Ingeniería* 24, 38 (2015), 79–96.
- [14] MAHMOUD, M. S. B., PIROVANO, A., AND LARRIEU, N. Aeronautical communication transition from analog to digital data: A network security survey. *Computer Science Review* 11 (2014), 1–29.
- [15] MARSH, A. *In World War I, British Biplanes Had Wireless Phones in the Cockpit*. Disponível em <https://spectrum.ieee.org/tech-history/dawn-of-electronics/in-world-war-i-british-biplanes-had-wireless-phones-in-cockpit>, 2020.
- [16] MATHWORKS. *MatLab - MathWorks - MATLAB Simulink*. Disponível em <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>, 2020.
- [17] MELO, C. S. Comunicações Rádio. Departamento de Formação Militar.
- [18] MITOLA, J. Software radios: Survey, critical evaluation and future directions. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 8, 4 (1993), 25–36.
- [19] MÄURER, N., AND BILZHAUSE, A. A Cybersecurity Architecture for the L-band Digital Aeronautical Communications System (LDACS). In *2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC)* (2018), pp. 1–10.
- [20] NOELEC. *LaNA - Wideband Low Noise Amplifier (LNA)*. Disponível em https://www.noolec.com/store/downloads/dl/file/id/92/product/315/ana_datasheet_revision_1.pdf, 2019.
- [21] NUAND. *bladeRF*. Disponível em <http://www.nuand.com/bladeRF-brief.pdf>.
- [22] NUNES, F. D. Telecomunicações. Instituto Superior Técnico.
- [23] PARCELAS, R. *Development of additional sensor capabilities for use in unmanned aerial vehicles under CIDIFA*, 2018.
- [24] PORTUGAL. *Conceito estratégico de defesa nacional*. 2013.
- [25] PRINCE, C. E. **Wireless telephony on aeroplanes**. *Journal of the Institution of Electrical Engineers* 58, 291 (1920), 377–384.
- [26] PYTHON PACKAGE INDEX. *PySimpleGUI27 2.4.1*. Disponível em <https://pypi.org/project/PySimpleGUI27/>.
- [27] RTL-SDR. *RTL-SDR Blog V3 Datasheet*. Disponível em <https://www.rtl-sdr.com/wp-content/uploads/2018/02/RTL-SDR-Blog-V3-Datasheet.pdf>.

- [28] SATELLITE PHONE STORE. *Cobham AVIATOR UAV 200 - 200Kbps*. Disponível em <https://satellitephonestore.com/catalog/sale/details/cobham-aviator-uav-200-200kbps>.
- [29] SCHNELL, M. Current Status of LDACS Development. ICAO Communications Panel, December 2014.
- [30] SERGEEV, V. A. *LuaRadio*. Disponível em <https://luaradio.io/>, 2020.
- [31] SOUTHEASTAEROSPACE. *Collins Aerospace VHF-22B*. Disponível em <https://www.seaerospace.com/sales/product/Collins%20Aerospace/VHF-22B>.
- [32] STACEY, D. *Aeronautical radio communication systems and networks*. John Wiley & Sons, 2008.
- [33] SYSTEMS, M. *DDL900 Amplifier*. Microhard Systems Inc.
- [34] SYSTEMS, M. *Operating Manual pDDL900*. Microhard Systems Inc.
- [35] *GitHub*. *GitHub Language Statistics*. Disponível em <https://github.com/madnight/githut>, 2020.
- [36] UNMANNED SYSTEMS SOURCE. *U-Pilot*. Disponível em <https://www.unmannedsystemssource.com/shop/autopilots/u-pilot/>.
- [37] VERICAL. *HackRF One - Software Defined Radio*. Disponível em <https://www.verical.com/datasheet/seed-development-limited-transceiver-109990245-5051173.pdf>, 2017.
- [38] WILLIAMS, A. *Getting Started With GNU Radio*. Hackaday, Disponível em <https://hackaday.com/2015/11/11/getting-started-with-gnu-radio/>, 2015.



**Anexo A - *Datasheet* do Rádio
VHF-22B, utilizado na aeronave
Epsilon TB-30**

WEIGHT:	5.6 lbs.	DIMENSIONS:	3.750"W x 3.50"H x 13.9"L
RELATED DOCUMENTS:	DO-138, Env Category AD/A/JNG/AAAEXXXX; TSO C37b and C38b, class 1, FCC rules and regulations, parts 15 and 87	TEMPERATURE:	-65 to +131 C
ALTITUDE:	55000 ft. max.	SHOCK:	6 g for 11 ms, operating
FREQUENCY RANGE:	117.000 to 136.975 or 151.975 MHz*	FREQUENCY STABILITY:	+0.0015%
CHANNEL SPACING:	25 kHz	FREQUENCY CONTROL:	2-out-of-5, in accordance w/ ARINC 410
CHANNEL CHANGE TIME:	Less than 50 ms	TRANSMIT-RECEIVE INTERVAL:	Less than 50 ms
RADIATED RFI:	Meets RTCA Paper DO-138, DO-109, DO-110	RF POWER OUTPUT:	20 watts nominal; 16 watts minimum
OUTPUT IMPEDANCE:	52 ohms, unbalanced	HARMONIC CONTENT:	60 dB down from carrier minimum
SPURIOUS CONTENT:	90 dB from carrier minimum	MODULATION CAPABILITY:	90% amplitude modulation
MODULATOR INPUT:	Carbon mic input 0.125 V adjustable, 150 ohms	SIDETONE OUTPUT:	100 milliwatts into 600 ohms with 90% modulation
DUTY CYCLE:	1-minute transmit; 4-minute receive	NOISE LEVEL:	50 dB below 85% modulation at 1000 Hz
AUDIO RESPONSE:	6-dB variation from 300 to 2500 Hz	AUDIO DISTORTION:	15% max, 85% modulation
RECEIVER SENSITIVITY:	6 dB (signal + noise)/noise for 3-uV signal; 30 dB (signal + noise)/noise for 100-uV signal	RECEIVER SELECTIVITY:	6 db= +8 kHz min, 60 db= +17 kHz max (for -001 unit); 6db= +15 KHz min, 60 dB= +35 KHz min (for -002 unit)
AGC RANGE:	Maximum 3-dB variation, 5 to 200,000 uV	RECEIVER AUDIO OUTPUT:	100 mW into 600 ohms, balanced
RECEIVER AUDIO RESPONSE:	6-dB variation from 300 to 2500 Hz, 1000-Hz reference	RECEIVER AUDIO DISTORTION:	7% max, 30% modulated signal

Figura A.1: *Datasheet* do Rádio VHF-22B.

B

Anexo B - Entrevista ao Chefe do Departamento de Operações Major João Caetano

Questão 1: Qual a tipologia de missões (ex: vigilância de fogos) desempenhadas pelos UAV's da Força Aérea? Em contexto de investigação e em contexto operacional?

Major Caetano: - Missões de interesse público: * vertente de vigilância, monitorização e rescaldo de incêndios florestais, integrados do Dispositivo Especial de Combate a Incêndios Florestais; * vertente de vigilância, patrulhamento marítimo, com identificação de atividades ilícitas, identificação de embarcações e envio da informação para entidades responsáveis pela atuação judicial. - Missões de Investigação e Desenvolvimento

Questão 2: Das tipologias indicadas, quais considera mais desafiantes do ponto de vista do operador? E porquê?

Major Caetano: - voo sobre terra, por limitações de segurança (sobrevoo de áreas edificadas, populações e maior tráfego aéreo)

Questão 3: Qual a classe de espaço aéreo em que os UAV's da FAP operam?

Major Caetano: - nomeadamente G e D.

Questão 4: Como é que são coordenados os voos em termos de ATC? Existe contacto rádio com um controlador, é feita comunicação telemóvel, etc?

Major Caetano: - Coordenação ATC efetuada via contacto telefónico (telemóvel ou rede fixa). - Atualmente estão a ser testadas soluções Radio Over IP para envio de comms voz para a torre de comunicações no alto da serra mais próxima/alta na envolvente da GCS do UAS, e retransmissão dessa comunicação voz via rádio aeronáutico. - Esta solução apresenta as limitações *de o alcance ser limitado fruto da baixa altitude da antena (colocada na serra) quando comparado com o UAV que opera a 6000ft (alt média); * no que toca à zona de operação do UAV, pois para UAV de longo alcance, o UAV poderá estar a operar em zona de comms aeronáuticas de bandas diferentes (ex: frequência da LISINFO da zona Centro é diferente da zona Norte). *em caso de handover para outra GCS ou outra antena diretiva.

Questão 5: Existe a possibilidade de outras aeronaves entrarem na área de operações do UAV?

Major Caetano: - Sim, frequentemente.

Questão 6: Qual a importância das comunicações para o voo do UAV? Quais as bandas/canais (ex: Lisboa Mil, diferentes torres, etc) que considera mais importantes?

Major Caetano: - total. Bandas aeronáuticas tipificadas para a aviação geral

Questão 7: No caso de considerar as comunicações de voz importantes, qual o raio (em torno da aeronave) em que seria importante ter comunicações?

Major Caetano: - idêntico ao da aviação geral. Alcance teórico limitado a $1.23\sqrt{\text{altitude avião}}$.

Questão 8: Na sua opinião bastaria receber as comunicações para monitorizar ou entende ser necessário emitir também?

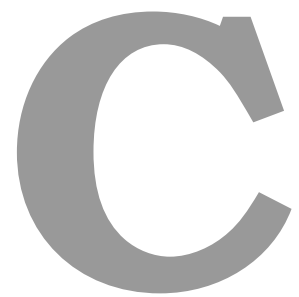
Major Caetano - ambas

Questão 9: Os operadores têm formação no que toca às comunicações aeronáuticas?

Major Caetano: - sim, claro

Questão 10: No caso de ser disponibilizada uma forma de comunicar em banda aeronáutica, que interface considera mais adequado? Headsets e microfone ativado por botão, um PTT, ou outro?

Major Caetano: - idealmente PTT com headset. Alternativa, PTT com speaker+mic.



Anexo C - Implementação para recepção e emissão FM

Este anexo apresenta o procedimento de validação de uma implementação para recepção de um sinal FM utilizando os dispositivos *RTL-SDR 2832U* e *HackRF One*.

O desafio proposto seria desenhar uma implementação que fosse capaz de receber um sinal FM, sendo que a validação desta implementação iria ser alcançada através da captação de sinais de estações de rádio nacionais, será realizada para ambos os dispositivos, sendo que as alterações de um para o outro serão explicadas posteriormente. De seguida irá ser feita uma fundamentação dos blocos escolhidos.

C.1 Recepção

C.1.1 *RTL-SDR 2832U*

O diagrama apresentado na Figura C.1 demonstra a implementação desejada, sendo que antes de escolher os blocos é necessário escolher as variáveis a utilizar. As duas variáveis serão o *sample rate* (quantidade de amostras num segundo) e o *down-rate* (valor utilizado para diminuir a quantidade de amostras desejadas), neste caso foi escolhido o valor de *sample rate* de 2 milhões de amostras por segundo e um valor de *down-rate* de 250 mil. O sinal é captado pela antena do dispositivo, nomeadamente o *RTL-SDR 2832U*, que seguidamente é processado por um bloco do *GNURadio Companion* dependente do tipo de dispositivo utilizado. Como é perceptível no esquema o bloco utilizado tem o nome de ***RTL-SDR Source***, este bloco irá utilizar as variáveis de *samp_rate*, de *tuner* (opção quer permite escolher a frequência pretendida) e de *rfgain* (que permite escolher o valor do ganho pretendido). Após a utilização deste bloco iremos ter 2 milhões de amostras complexas que necessitarão de filtragem, deste modo o próximo bloco será um filtro passa-baixo com o intuito de filtrar apenas a informação pretendida, assim irá ser utilizado do *samp_rate* dividido pelo valor de *down_rate*, obtendo um valor de 8 (mantém-se 1/8 da informação), uma frequência de corte de 100 kHz e uma frequência de transição de 100000. Após a informação ser filtrada terá que ser desmodulada, com o intuito de ser apresentada e reproduzida pelo computador, para isso é utilizado o bloco ***WBFM Receive*** (*Wide Band Frequency Modulation Receive*) que irá ter como taxa de amostragem os 250 kHz resultantes da divisão do *samp_rate* pelo 8 obtido anteriormente. Neste momento temos um sinal com uma taxa de amostragem de 250 kHz, no entanto queremos obter uma taxa de amostragem compatível com as colunas do computador, apontando então para os 24 kHz, assim é utilizado um ***Rational Resampler*** para podermos alterar a taxa de amostragem. Este bloco tem 2 parâmetros relevantes, o de *Interpolation* e o de *Decimation* e o seu objetivo é multiplicar e dividir o valor de *sample rate*, respetivamente. Posto isto, para levar o valor de 250 kHz para 24 kHz, primeiramente divide-se o valor de 250 kHz por 250, obtendo 1 kHz, de seguida multiplica-se por 24, ficando com os 24 kHz. De seguida, tendo já o sinal pretendido, adiciona-se um bloco de multiplicação com a variável *volume*, para poder ajustar o volume do sinal. Por fim existe o bloco ***Audio Sink*** que liga o sinal às colunas do computador e o reproduz.

De notar ainda os blocos que permitem visualizar o sinal em diferentes fases do processo, sendo que nesta implementação existe um bloco que é utilizado em duas etapas distintas. Inicialmente, após o sinal ser captado é visualizado através do bloco **WX GUI FFT Sink**, este bloco gera um gráfico com a transformada do sinal permitindo a visualização de todo o sinal no espectro pretendido, o outro momento pertinente de analisar é após a desmodulação, com o objectivo de entender se o sinal é o pretendido (todos os parâmetros são adaptados à fase correspondente, como podemos inferir da Figura C.1).

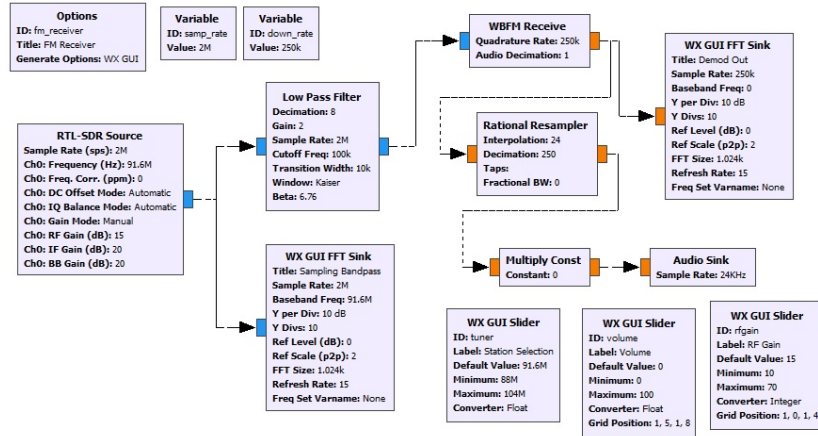


Figura C.1: Esquema da Implementação de um Receptor FM através de um *RTL-SDR 2832U*.

C.1.2 HackRF One

No caso da utilização do dispositivo *HackRF One*, a implementação utilizada é exactamente a mesma, exceptuando apenas o bloco inicial. Em vez de utilizar o bloco **RTL-SDR Source** é utilizado o bloco **osmocom Source** pois o dispositivo não é um RTL e o bloco utilizado é compatível com o dispositivo seleccionado. Apesar de haver alteração do bloco as variáveis utilizadas continuam a ser as mesmas.

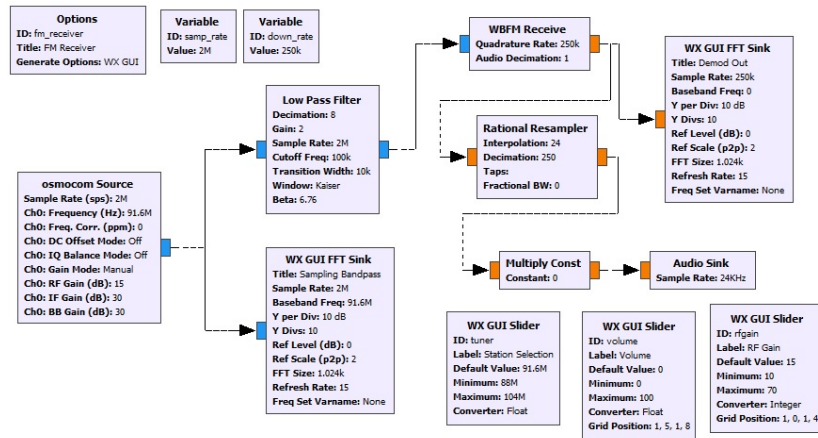


Figura C.2: Esquema da Implementação de um Receptor FM através de um *HackRF One*.

C.2 Emissão

Apesar da implementação a utilizar ser em AM é pertinente incluir o diagrama de blocos de emissão FM para melhor familiarização com o sistema e término da lógica iniciada com a recepção FM.

Inicialmente é escolhida a fonte do sinal a transmitir, neste caso será utilizado o bloco **Wav File Source** que permite escolher um ficheiro de áudio. De seguida o ficheiro é processado pelo bloco **WBFM Transmit** que efectua a modulação do sinal. Este bloco recebe como argumentos o valor de taxa de amostragem do ficheiro, bem como a taxa de quadratura. Após efectuar a modulação é necessário fazer uma nova amostragem do sinal para poder ser transmitido, assim é utilizado o bloco **Rational Resampler** com um valor de multiplicação de 100. Desta maneira o sinal está pronto a ser transmitido através do bloco **osmocom Sink**, na frequência desejada. Importante notar que o bloco **WX GUI FFT Sink** é um bloco que permite visualizar a transformada do sinal no ponto seleccionado, desta forma garantindo que o sistema é executado como previsto.

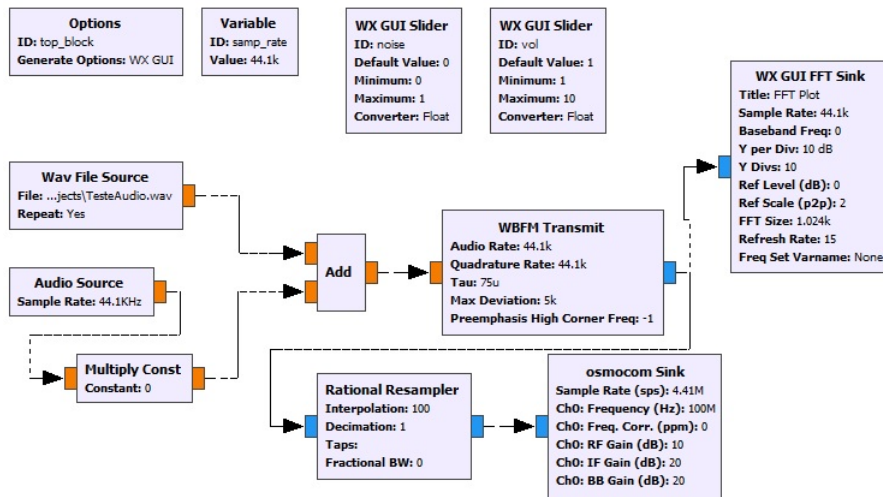


Figura C.3: Esquema da Implementação de um Emissor FM através de um *HackRF One*.

D

Anexo D - Implementação para recepção de sinal *AM* através do dispositivo *RTL-SDR 2832U*

No caso da utilização do dispositivo *RTL-SDR 2832U*, a implementação utilizada é exactamente a mesma, exceptuando apenas o bloco inicial. Em vez de utilizar o bloco *osmocom Source* é utilizado o bloco *RTL-SDR Source* pois o dispositivo é um RTL e o bloco utilizado é compatível com este dispositivo. Apesar de haver alteração do bloco as variáveis utilizadas continuam a ser as mesmas referidas no Capítulo 4.3.1. É possível consultar a implementação na Figura D.1.

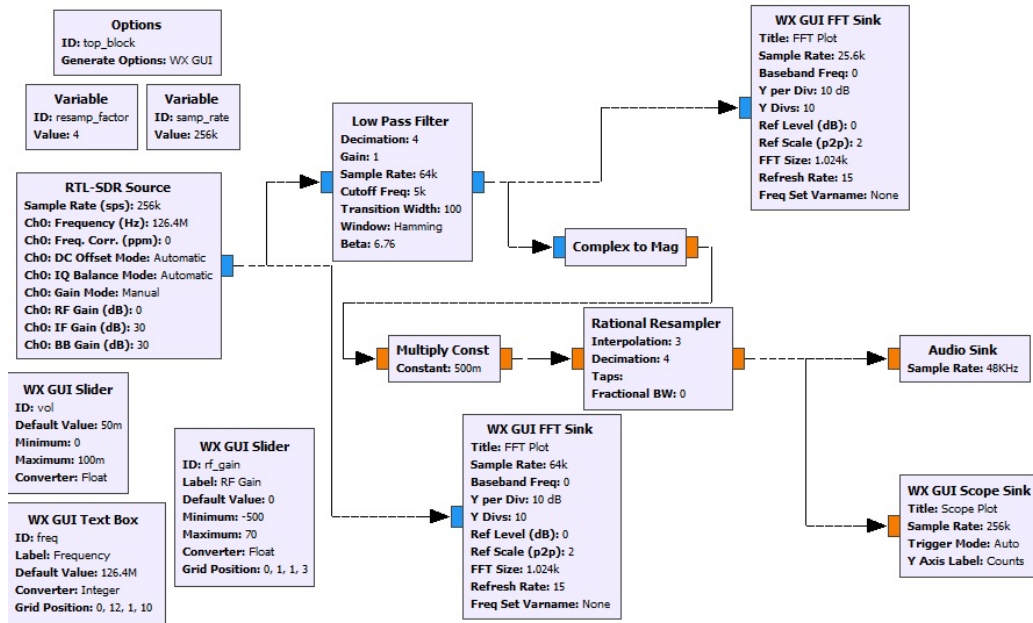


Figura D.1: Esquema da Implementação de um Receptor AM através de um *RTL-SDR 2832U*.

