



ACADEMIA DA FORÇA AÉREA

Avaliação e comparação de pilotos automáticos para uso no contexto dos *Unmanned Aircraft Systems* (UAS)



Henrique Albuquerque Courela Matias Silva

Aspirante a Oficial-Aluno/Piloto-Aviador 138263-C

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Aeronáutica Militar
Especialidade de Piloto-Aviador

Júri

Presidente:	Cor/EngAer José Morgado
Orientador:	Cap/EngEI Tiago Oliveira
Co-orientador:	Cap/EngEI Gonçalo Cruz
Vogal:	Maj/TMAEQ Paula Gonçalves

Sintra, abril de 2017

Agradecimentos

Este trabalho de investigação não seria possível sem o contributo de todos aqueles que me auxiliaram na superação desta etapa na minha vida académica. Assim, gostaria de dedicar as minhas primeiras palavras de agradecimento aos Senhores Capitães Tiago Oliveira e Gonçalo Cruz, os meus orientadores. Conciliando as suas inúmeras obrigações profissionais e pessoais com a orientação desta dissertação, conferiram-me sempre total apoio e disponibilidade. A eles, pelos conselhos, ajuda, compreensão e ensinamentos transmitidos, o meu profundo agradecimento.

Ao meu curso e amigos. Sendo este um dos últimos passos do meu percurso na Academia da Força Aérea, foi com muito orgulho e sentimento de gratidão que o partilhei com todos vós. O meu obrigado pela paciência e auxílio nos momentos mais exigentes, por me lembrarem do objetivo final e da espetacularidade do caminho que trilhamos.

Por fim, à minha família. Previamente a este momento encontram-se múltiplos desafios superados. Em todos eles revejo o vosso incondicional e imensurável apoio. O meu muito obrigado por me acompanharem mais uma vez num novo desafio, e por me permitirem a realização de um sonho que cada vez mais se materializa.

Resumo

Dada a evolução da tecnologia e o crescente número de utilizadores de sistemas aéreos com capacidade de voo autónomo, existem atualmente diversos sistemas de piloto automático disponíveis, passíveis de serem integrados nas plataformas autónomas da Força Aérea Portuguesa (FA). Estas soluções agrupam-se essencialmente em dois conjuntos: o primeiro refere-se aos sistemas *closed source*, sendo estes testados e comercializados como produto final; o segundo representa os sistemas *open source*, possíveis de serem customizados e alterados pelo utilizador segundo as suas necessidades.

A integração de um piloto automático numa aeronave não tripulada apresenta alguns desafios a considerar. Cumprir com os requisitos de aeronavegabilidade permitindo a integração em espaço aéreo não segregado e responder às exigências operacionais das Forças Armadas (FFAA), são aspetos decisivos no desenvolvimento deste tipo de plataformas. Desta forma, esta dissertação tem como objetivo determinar, de uma pré-seleção de pilotos automáticos incluindo sistemas fechados e *open source*, aquele que conferirá maiores vantagens uma vez integrado nas plataformas aéreas da FA.

A avaliação comparativa realizada teve por base critérios para certificação de aeronavegabilidade, publicados sob a forma de Standardization Agreements (STANAG), e publicações oficiais com a especificação dos requisitos operacionais das Forças Armadas (FFAA) para os UAS. Esta dissertação apresenta uma discussão detalhada sobre os pilotos automáticos, à luz dos requisitos identificados, tendo em conta o nível de complexidade e esforço de integração que cada solução implica.

Decorrendo da metodologia adotada foi possível concluir que ambos os pilotos automáticos analisados apresentam semelhantes capacidades, porém em diferentes estados de maturação.

Palavras-chave: UAS; Piloto automático; *Piccolo*; *Pixhawk*.

Abstract

Due to the continuous growth and development of the autopilots for Unmanned Aircraft Systems (UAS) as well as the spreading of this type of technology for the general public, there are today many options for the Portuguese Air Force to consider. These options can be grouped in two different fields. One encompasses closed source solutions and the other refers to open source systems. The selection of an autopilot includes some issues to be taken into account. The ability to fulfil the airworthiness requirements allowing integration in non-segregated air space and respond to the Armed Force's operational demands are some of the concepts to consider when choosing an autopilot. The objective of this dissertation is to determine which auto pilot, from a given pre-selection, is potentially more suited to be installed in the Portuguese Air Force's UAS.

The evaluation of the auto pilots was supported on airworthiness requirements, obtained from Standardization Agreements (STANAG), and operational ones, extracted from official publications regarding the operational employment of the UAS by the Portuguese Armed Forces. This dissertation presents a detailed discussion on the previously selected autopilot's characteristics, regarding the requirements and the challenges for the integration of each one into a UAS airframe.

The methodology followed throughout this research work allowed the understanding that both systems show similar capacities but in different stages of evolution.

Keywords: UAS, *Autopilot*, *Piccolo*; *Pixhawk*.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de tabelas	xiii
Lista de Abreviaturas	xv
Glossário	xix
Capítulo 1. Introdução	1
1.1 <i>Enquadramento</i>	1
1.2 <i>Âmbito, motivação e problemática</i>	3
1.3 <i>Objetivo e metodologia</i>	4
1.4 <i>Constrangimentos</i>	6
1.5 <i>Organização da dissertação</i>	6
Capítulo 2. Revisão Bibliográfica	9
2.1 <i>Conceitos UAS e Piloto Automático</i>	9
2.1.1 <i>Sistema de controlo de voo</i>	11
2.1.2 <i>Sensores de estado</i>	11
2.1.3 <i>Arquitetura de comunicações</i>	12
2.2 <i>Visão estratégica da FA para os UAV</i>	13
Capítulo 3. Requisitos Operacionais	17
3.1 <i>Espetro de missões da Força aérea</i>	20
3.1.1 <i>Observação Tática</i>	20
3.1.2 <i>Vigilância marítima próxima</i>	21
3.1.3 <i>Busca e Salvamento</i>	21
3.1.4 <i>Operação em binómio ar-ar</i>	22
3.1.5 <i>Outras missões de interesse público</i>	22
3.2 <i>Requisitos operacionais de referência da Força Aérea</i>	22
3.3 <i>Espetro de missões da Marinha e Exército</i>	24

3.3.1	Requisitos operacionais de referência da Marinha -----	24
3.3.2	Requisitos operacionais de referência do Exército -----	25
3.4	<i>Resumo dos requisitos operacionais</i> -----	25
Capítulo 4.	Aeronavegabilidade -----	29
4.1	<i>Enquadramento Legal</i> -----	29
4.2	<i>Requisitos de Aeronavegabilidade</i> -----	32
Capítulo 5.	Seleção de Pilotos automáticos -----	39
5.1	<i>Pilotos automáticos closed source e open source</i> -----	39
5.1.1	Pilotos automáticos Open Source-----	39
5.1.2	Autopilots Closed Source -----	41
5.2	<i>Pilotos automáticos selecionados para avaliação</i> -----	43
5.2.1	Piccolo II -----	45
5.2.2	Pixhawk -----	46
5.2.3	Configuração do Pixhawk considerada para avaliação-----	50
Capítulo 6.	Avaliação comparativa dos pilotos automáticos -----	53
6.1	<i>Requisitos de Aeronavegabilidade</i> -----	53
6.2	<i>Requisitos Operacionais</i> -----	60
6.2.1	Alcance -----	62
6.2.2	Navegação -----	62
6.2.3	Payload integrado -----	63
6.2.4	Data link -----	67
Capítulo 7.	Discussão dos resultados obtidos -----	69
Capítulo 8.	Conclusões e trabalhos futuros -----	71
8.1	<i>Sugestões para trabalhos futuros</i> -----	72
Capítulo 9.	Bibliografia -----	73
Anexos	-----	79

Índice de Figuras

Figura 1-1 - Metodologia utilizada na elaboração da dissertação de mestrado.	5
Figura 2-1 - Componentes de um UAS. (Extraído de (JAPCC, 2010), “Figure 1”).	10
Figura 2-2 - Arquitetura de um sistema UAS (Extraído de (Austin, 2010), “Figure 13.1”).	10
Figura 2-3 - Arquitetura funcional de um piloto automático (Extraído de (HaiYang et al., 2010), “Fig.3”).	11
Figura 2-4 - Esquema da arquitetura de comunicações na operação de um UAS. .	12
Figura 3-1 - AeroVironment RQ-11B Raven (esquerda) e um militar do Exército dos Estados Unidos em campanha a lançar a aeronave (direita) (Extraído de (AeroVironment, 2017)).	20
Figura 5-1 - Hardware do piloto automático Paparazzi - Tiny 13 (Extraído de (HaiYang et al., 2010), “Fig.8”).	40
Figura 5-2 - Hardware MNAV (esquerda) e piloto automático Crossbow Mnav + Stargate Autopilot (direita) (Extraído de (HaiYang et al., 2010)).....	40
Figura 5-3 - Hardware Kestrel Autopilot V2.4 (Extraído de (Lockheed Martin Corporation, 2017)).	42
Figura 5-4 - Hardware do piloto automático U Pilot (Extraído de (Airelectronics UAV Autopilots, 2016)).	42
Figura 5-5 - Hardware do Piloto Automático Veronte (Extraído de (Embention, 2016)).	43
Figura 5-6 - Piloto automático Piccolo II (Extraído de (Cloud Cap Technologies, [s.d.])).	45
Figura 5-7 - Esquema genérico da rede de comunicações com um UAS.	46
Figura 5-8 - Placa PX4FMU (esquerda) e placa PX4IO (direita) (Extraído de PX4 Autopilot).	47
Figura 5-9 - Hardware Pixhawk (Extraído de PX4 Autopilot).	47
Figura 5-10 - Modem rádio (Extraído de (PX4 Autopilot), "Radio Modems")	49
Figura 5-11 - PX4 Autopilot Air speed sensor (Extraído de (PX4 Autopilot), “PX4 Air Speed Sensor”).	51
Figura 6-1 - Display da aplicação Mission Planner – Excerto do pre-flight checklist com botão de edição (Extraído de (Ardupilot, 2016)).	54

Figura 6-2 - Configuração típica do PCC (esquerda) e do Mission Planner (direita) (Extraído de (Barchet et al., 2012) e (Ardupilot, 2016)).	56
Figura 6-3 – Pixhawk com módulo GPS + Compass da 3D Robotics (Extraído de (Ardupilot, 2016)).	63
Figura 6-4 - Janela Payload Comm Settings retirada do PCC.....	64
Figura 6-5 - Arquitetura dos Sistemas do UAS do CIDIFA.	65
Figura 6-6 - SToRM32 Gimbal Controller (Extraído de (Ardupilot, 2016)).	67

Índice de tabelas

Tabela 2-1 - Roadmap tentativo da edificação de capacidade UAS nacional (Extraído de (MFA 500-12, 2013), "Tabela 5-II")).....	14
Tabela 3-1 - Excerto de missões atribuídas às FFAA (Extraído de (CEDN, 2013)).	17
Tabela 3-2 - Aplicações de um UAS nacional (Extraído de Vicente (2013)).	19
Tabela 3-3 - Requisitos Operacionais (Extraídos de (MFA 500-12, 2013) e (Vicente, 2013)).	26
Tabela 5-1 - Configurações possíveis de flight stack e software de controlo para o Pixhawk.	50
Tabela 6-1 - Requisitos de Aeronavegabilidade - Sistemas e Equipamentos (Extraído de (NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2014)).	53
Tabela 6-2 - Requisitos de Aeronavegabilidade – data link de comando e controlo (Extraído de (NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2014)).	55
Tabela 6-3 - Requisitos de Aeronavegabilidade – Ground Station (Extraído de (NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2014)).	55
Tabela 6-4 - Requisitos de Aeronavegabilidade – Informação de voo apresentada na UCS (Extraído de (NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2014)).	56
Tabela 6-5 - Requisitos de Aeronavegabilidade - Descolagem Automática (Extraído de (NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2014)).	57
Tabela 6-6 - Requisitos de Aeronavegabilidade - Precisão de Navegação (Extraído de (NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2014)).	58
Tabela 6-7 - Requisitos de Aeronavegabilidade - Aterragem Automática (Extraído de (NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2014)).	58
Tabela 6-8 - Requisitos de Aeronavegabilidade – Trim (Extraído de (NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2014)).	59
Tabela 6-9 - Requisitos de Aeronavegabilidade – Controlabilidade e manobrabilidade (Extraído de (NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2014)).	59
Tabela 6-10 - Requisitos de Aeronavegabilidade – Recuperação de emergência (Extraído de (NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2014)).	60
Tabela 6-11 - Requisitos de Aeronavegabilidade – Warnings (Extraído de (NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2014)).	60
Tabela 6-12 - Requisitos Operacionais (Extraído de (Alfaro, 2015), (Chiote, 2012), (MFA 500-12, 2013), (Oliveira, 2014), (Vicente, 2013))	61

Tabela 6-13 - Comparação de Sistemas Periféricos compatíveis com o Piccolo e Pixhawk. 65

Lista de Abreviaturas

AAN	Autoridade Aeronáutica Nacional
ADF	<i>Automatic Direction Finder</i>
AFA	Academia da Força Aérea
AIS	<i>Automatic Identification System</i>
AIS	<i>Automatic Identification System</i>
BDA	<i>Battle Damage Assessment</i>
BTID	Base Tecnológica e Industrial de Defesa
CE	Comissão Europeia
CEDN	Conceito Estratégico de Defesa Nacional
CEM	Conceito Estratégico Militar
CIAFA	Centro de Investigação da Academia da Força Aérea
CIDIFA	Centro de Investigação e Inovação da Força Aérea
CoE	<i>Centre of Excellence</i>
DGAID	Direção Geral de Armamento e Infraestruturas de Defesa
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
EASA	<i>European Aviation Safety Agency</i>
EDA	<i>European Defense Agency</i>
ELINT	<i>Electronic Intelligence</i>
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i>
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i>
EMV	<i>Electromagnetic Vulnerability</i>

EO	Eletro-ótico
FA	Força Aérea Portuguesa
FAC	<i>Forward Air Controller</i>
FFAA	Forças Armadas
FFSS	Forças e Serviços de Segurança
GCS	<i>Ground Control Station</i>
GNR	Guarda Nacional Republicana
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HALE	<i>High Altitude Long Endurance</i>
ICAO	<i>Internacional Civil Aviation Organization</i>
IESM	Instituto de Estudos Superiores Militares
ISR	<i>Intelligence, Surveillance and Reconnaissance</i>
ISTAR	<i>Intelligence, Surveillance, Target Acquisition, and Reconnaissance</i>
IV	Infravermelho
JAPCC	<i>Joint Air Power Competence CentRE</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stymulated Emission of Radiation</i>
LDN	Lei de Defesa Nacional
LEA	Licenças Especiais de Aeronavegabilidade
LOS	<i>Line of Sight</i>
MALE	<i>Medium Altitude Long Endurance</i>
MAWA	<i>Military Airworthiness Authorities</i>
MIP	Missões de Interesse Público

NATO	<i>North Atlantic Treaty Organization</i>
NRBQ	Nuclear Radiológico Biológico e Químico
OMIP	Outras Missões de Interesse Público
ORC	Operações de Resposta a Crises
PA	Piloto Automático
PERSEUS	<i>Protection of European Seas and borders through the intelligent Use of Surveillance</i>
PITVANT	Projeto de Investigação e Tecnologia em Veículos Aéreos Não-Tripulados
PPM	<i>Pulse Position Modulation</i>
PSP	Polícia de Segurança Pública
QREN	Quadro de Referência Estratégia Nacional
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SCTN	Sistema Científico Tecnológico Nacional
SEAGULL	Sistemas Inteligentes de Suporte ao Conhecimento Situacional Marítimo baseados em Veículos Aéreos não Tripulados
SFN	Sistema de Forças Nacional
SIGINT	<i>Signals Intelligence</i>
SRR	<i>Search and Rescue Region</i>
STANAG	<i>Standardization Agreement</i>
TA	<i>Target Acquisition</i>
UAS	<i>Unmanned Aircraft System</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>

Glossário

- (1) **Ambiente operacional permissivo.** As entidades civis bem como as autoridades militares da nação hospedeira possuem a intenção e capacidade de fornecer assistência às operações executadas por uma determinada unidade aérea (Vicente, 2013).
- (2) **Base Tecnológica e Industrial de Defesa (BTID).** Subconjunto do Sistema Científico e Tecnológico Nacional (SCTN) formado pelas entidades com capacidade para intervir numa ou mais etapas do ciclo de vida dos equipamentos e sistemas utilizados pela Defesa (Inteli, 2016).
- (3) **Closed Source.** Programas informáticos nos quais o código fonte se encontra fechado ao público e está sujeito a licenças de propriedade (Information Technology Blog, 2015).
- (4) **Data link.** Comunicação wireless entre uma estação de controlo e o UAS. Permite troca de informações de comando e controlo, bem como de dados do *payload* (JAPCC, 2010).
- (5) **Firmware.** *Software* que se encontra num processador de memória não volátil (Ardupilot, 2016).
- (6) **Intelligence, Surveillance and Reconnaissance (ISR).** Conjunto de ações executadas para a prossecução de uma maior consciência do espaço de batalha, através da recolha, processamento, exploração e disseminação de informações precisas e atuais (Vicente, 2013).
- (7) **Open Source.** Programas informáticos nos quais o código fonte se encontra publicamente acessível (Information Technology Blog, 2015).
- (8) **Payload.** Inclui os sensores, carga e armamento transportados pela aeronave (JAPCC, 2010).
- (9) **Reconhecimento aéreo.** Recolha de informações de interesse, quer através da observação visual, quer pela utilização de sensores embarcados nos meios aéreos (MFA 500-12, 2013).
- (10) **Reconhecimento.** Missão levada a cabo para obter, através da observação visual ou por outros métodos de deteção, informações de atividades, recursos, características geográficas, hidrográficas, etc., de uma determinada área (MFA 500-12, 2013).

- (11) **Sistema Científico e Tecnológico Nacional (SCTN).** Conjunto de recursos humanos, financeiros e institucionais, bem como atividades científicas que possuem como objetivo a disseminação e aplicação de novos conhecimentos.
- (12) **Transponder.** Sistema eletrônico que emite uma resposta quando recebe uma interrogação numa determinada frequência eletromagnética. A resposta emitida permite a identificação da aeronave nos radares de controlo aéreo ou nos sistemas de identificação de outras aeronaves (Vicente, 2013).
- (13) **Vigilância.** Observação sistemática do espaço aéreo, superfície ou subsuperfície, de lugares, pessoas ou coisas, por meios visuais, acústicos, eletrónicos, fotográficos ou outros (FAP, 2013).

Capítulo 1. Introdução

1.1 Enquadramento

Os *Unmanned Aircraft Systems* (UAS) são um ponto incontornável na discussão do poder aéreo nos cenários bélicos atuais. No presente, mais de 30 nações desenvolvem e constroem mais de 250 tipos de UAS, e ultrapassam já 40 os países que operam mais de 80 tipos destas plataformas (MFA 500-12, 2013). As potenciais vantagens conferidas por este tipo de recurso fazem da sua evolução e exploração um passo natural a ser tomado no desenvolvimento de sistemas de armas (Vicente, 2011).

Tendo sido empenhados inicialmente e de forma metódica em missões de reconhecimento pelos Estados Unidos da América na guerra do Vietname (1955-1975), os UAS têm vindo a expandir as suas capacidades ao longo do tempo. Iniciando a sua actividade operacional em missões ISR (*Intelligence, Surveillance and Reconnaissance*), encontram-se atualmente inseridos nos dispositivos operacionais de alguns países, executando missões de elevada complexidade. A evolução da tecnologia permitiu adicionar às missões ISR variadas capacidades como a designação de alvos – *Target Acquisition* (TA) – resultando a sigla ISTAR (*Information, Surveillance, Target Acquisition and Reconnaissance*), bem como *Battle Damage Assessment* (BDA), deteção de ataques nucleares, radiológicos, biológicos e químicos (NRBQ), deteção de minas, recolha de dados *Electronic Intelligence* (ELINT) e *Signal Intelligence* (SIGINT) e a execução de ataques armados. Estes atributos demonstram a vasta aplicabilidade destas aeronaves ao âmbito de missões sucitamente caracterizado por “*dull, dirty, and dangerous*” (Oliveira, 2014).

As potencialidades deste tipo de plataformas aéreas conferem aos UAS um estatuto de particular relevância. O leque de configurações disponíveis possibilitam também a operação complementar às aeronaves tripuladas. Esta ação permite a partilha da carga de esforço em missões como a extensão da capacidade de sensores aéreos para deteção, localização e identificação de ameaças e também em missões de vigilância e controlo do espaço de envolvimento e interesse estratégico nacional. Resumidamente, será seguro afirmar que estas aeronaves poderão contribuir para ampliar as capacidades do Sistema de Forças Nacional (SFN) (Vicente *et al.*, 2013).

Perspetivando a aplicabilidade destas plataformas, estas poderão assim colaborar para a prossecução das missões atribuídas aos diferentes ramos das Forças Armadas (FFAA) e Forças de Segurança (FFSS). As missões que lhes são adjudicadas decorrem do Conceito Estratégico Militar (CEM) (MDN, 2014), que segue por sua vez as orientações estratégicas do Conceito Estratégico de Defesa Nacional (CEDN). Este documento, elementar na estratégia da defesa nacional, realça a capacidade de vigilância e controlo do território nacional, a fiscalização do espaço aéreo e marítimo, a capacidade de projecção de forças e a intervenção em Missões de Interesse Público (MIP). O SFN responde a estas capacidades exigidas, porém, e como também definido no CEDN, “*os investimentos devem ser seletivos e concentrar-se em equipamentos de utilidade tática e estratégica que assegurem resultados operacionais significativos a custos mais baixos*”. Neste ponto reside um dos principais contributos dos UAS: a possibilidade de colaboração na execução das missões atribuídas à FA e às FFAA proporcionando, eventualmente, um custo de operação mais reduzido (Vicente *et al.*, 2013).

A Força Aérea Portuguesa, por intermédio da sua Academia e em colaboração com diversas entidades da Base Tecnologia e Industrial de Defesa (BTID) e do Sistema Científico Tecnológico Nacional (SCTN), desde 1996 que tem vindo a explorar o desenvolvimento de plataformas aéreas não tripuladas, participando ativamente em diferentes projectos de investigação e desenvolvimento neste âmbito (Costa, 2011).

Actualmente, a FA possui diversas plataformas não tripuladas (desenvolvidas nos seus centros de investigação) para fins de investigação científica, demonstração de tecnologia e teste de conceito de operações. Tendo em consideração este contexto e os desafios que lhe estão associados, esta dissertação procura contribuir para o conhecimento científico sobre o estado da arte no que respeita à capacidade de voo autónomo das plataformas, em particular sobre os sistemas de piloto automático (PA). A secção seguinte apresenta em detalhe a motivação para a problemática em estudo.

1.2 Âmbito, motivação e problemática

Por definição, tendo em conta a capacidade de voo autónomo de uma aeronave não tripulada, o PA assume-se como um dos subsistemas principais na sua arquitetura. O piloto automático assegura que a aeronave é capaz de seguir de forma autónoma referências de altitude, rumo, velocidade e atitude, controlando de forma automática a deflexão das suas superfícies de voo. Tipicamente, este sistema encontra-se integrado com outros equipamentos, tais como sensores eletro-óticos (EO), sensores de navegação ou sistemas de comunicações para comando e controlo. Dada a sua relevância no contexto da capacidade de voo autónomo, será este o objeto de estudo desta investigação.

Ao longo das actividades de Investigação e Desenvolvimento (I&D) de UAS na Academia da Força Aérea (AFA), foram utilizadas diferentes gerações de pilotos automáticos de acordo com os avanços tecnológicos da época e com o estado de maturação dos veículos aéreos. Neste contexto, o Centro de Investigação, Desenvolvimento e Inovação da Força Aérea (CIDIFA) tem recorrido ao piloto automático da *Cloud Cap Technologies*¹ (Piccolo II), que tem permitido realizar missões com grau de complexidade moderada, inseridas no contexto dos projectos de investigação e desenvolvimento como o PITVANT ou o SEAGULL (FAP - DCSI, 2017).

Até ao presente, as sucessivas versões de pilotos automáticos eram lançadas a um ritmo reduzido e por um número limitado de fornecedores. Mais recentemente, dada a crescente disseminação da tecnologia, associada a custos de produção cada vez mais reduzidos, encontram-se disponíveis na atualidade múltiplas alternativas a estes equipamentos, muitas criadas por comunidades de utilizadores, oferecendo capacidades (de *hardware* e *software*) que não eram comuns até então. Estes sistemas possuem a dupla vantagem de não estarem sujeitos a licenças específicas de utilização e de permitirem acesso aberto ao código fonte (o capítulo 5 apresenta de forma resumida as diferentes ofertas de sistemas de piloto automático disponíveis e as suas principais características).

¹ <http://www.cloudcaptech.com>

Em termos gerais, a operação dos UAS apresenta alguns desafios. Estes poderão ser agrupados em quatro áreas, sendo estas: integração em espaço aéreo não segregado, robustez do *data link* de comando e controlo, utilização de sistemas de navegação baseados em *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS) e capacidade de operação em condições meteorológicas adversas (Vicente *et al.*, 2013). Cada alternativa de PA faculta uma resposta diferente a estes campos.

A recente aprovação da participação do CIDIFA em projectos de investigação de natureza diversa como o TROANTE e SUNNY (Morgado, 2016), reforça também os requisitos estabelecidos para os UAS, em particular de fiabilidade, segurança e escalabilidade.

Considerando as actuais necessidades impostas pela visão estratégica da FA para os UAS (MFA 500-12, 2013) e os requisitos operacionais e de aeronavegabilidade exigidos às plataformas, torna-se relevante estudar quais as alternativas de pilotos automáticos actualmente disponíveis que poderão ser utilizadas nos UAS desenvolvidos pela FA.

Deste modo, foi elaborada a seguinte pergunta de partida:

“Da pré-seleção de pilotos automáticos, qual o mais vantajoso para a integração nos UAS a serem produzido pela FA?”

1.3 Objetivo e metodologia

Este trabalho de investigação tem por objetivo:

Avaliar e comparar uma pré-seleção de pilotos automáticos para a posterior integração nos UAS do CIDIFA.

Para que o cumprimento deste objetivo fosse possível, o método de investigação adotado para esta dissertação foi composto por diferentes fases (ver Figura 1-1).

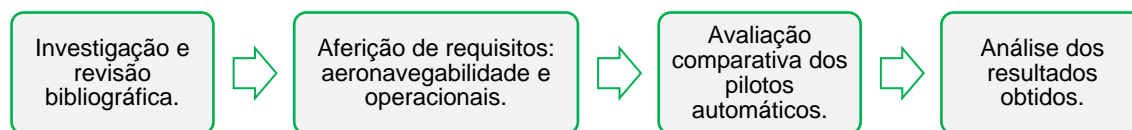


Figura 1-1 - Metodologia utilizada na elaboração da dissertação de mestrado.

Na primeira fase deste trabalho foi revista a bibliografia existente sobre a temática abordada. Para tal, foram analisados os documentos e publicações relevantes para a problemática em estudo. Este passo da investigação procurou responder aos seguintes objetivos específicos:

1. Identificação da arquitetura dos UAS do CIDIFA;
2. Identificação das características técnicas dos pilotos automáticos pré-selecionados para a avaliação comparativa;

Na segunda fase do trabalho, depois de analisadas as obras de suporte para esta dissertação, foram condensados, das variadas fontes de informação, os requisitos operacionais e de aeronavegabilidade respeitantes à plataforma na qual será integrado o piloto automático. Esta etapa da dissertação foi desenvolvida no sentido de cumprir os seguintes objetivos específicos:

1. Identificação dos requisitos operacionais exigidos;
2. Identificação dos requisitos de aeronavegabilidade exigidos.

Depois de reunidos os requisitos operacionais e de aeronavegabilidade, os pilotos automáticos pré-selecionados foram analisados comparativamente. A avaliação consistiu na verificação do cumprimento das exigências obtidas na fase anterior da investigação. Os objetivos específicos deste passo da investigação consistiram em:

1. Verificar quais os requisitos operacionais e de aeronavegabilidade que são cumpridos por cada piloto automático;
2. Construir uma tabela comparativa dos pilotos automáticos que resume os resultados da análise realizada.

A última etapa da dissertação de mestrado consiste numa análise dos resultados obtidos. A interpretação da tabela criada, combinando o grau de adequabilidade dos pilotos automáticos aos requisitos definidos, procura responder à pergunta de partida.

1.4 Constrangimentos

Ao longo do desenvolvimento desta dissertação, um dos fatores limitadores do trabalho de investigação foi o facto de todas as aeronaves de asa fixa do centro de investigação estarem exclusivamente equipadas com o piloto automático *Piccolo II*.

Devido a este facto, a avaliação das características das alternativas de pilotos automáticos analisados nesta dissertação, incluindo o respetivo *software* de comando e controlo, foi realizada de acordo com a respetiva documentação técnica de suporte, bem como testemunhos e resultados partilhados pela comunidade de utilizadores.

1.5 Organização da dissertação

De modo a permitir uma leitura mais fácil, bem como uma organização de conteúdos clara e lógica, esta dissertação foi dividida em oito capítulos.

Capítulo 1: é feita uma breve contextualização sobre a utilização dos UAS na atualidade. São abordados conceitos como a sua importância e aplicabilidade nos cenários bélicos atuais, e de que modo estas plataformas se apresentam como uma potencial mais valia para as Forças Armadas e Forças de Segurança. Posteriormente a esta secção introdutória são apresentados o âmbito e a motivação desta dissertação, bem como a problemática a que esta procura dar resposta. Finalmente, são expostos os objetivos e metodologia de investigação e ainda os constrangimentos encontrados ao longo da mesma.

Capítulo 2: é apresentada a revisão bibliográfica. Nesta secção da dissertação é abordado o conceito de piloto automático, onde se aprofunda a sua função, arquitetura e integração com outros elementos que compõem o UAS. Neste capítulo é também apresentada a visão estratégica da FA para os UAS onde, nesse contexto,

se apresenta a contribuição da investigação realizada na FA até agora e as perspectivas de futuro.

Capítulo 3: são identificados os requisitos operacionais que irão mais tarde ser utilizados para avaliar os pilotos automáticos pré-selecionados. Ao longo deste capítulo são analisadas também as perspectivas de emprego operacional por parte dos diferentes ramos das Forças Armadas. Os requisitos aplicáveis ao objeto de estudo são sumarizados no final deste capítulo.

Capítulo 4: neste capítulo elencam-se os requisitos de aeronavegabilidade que deverão ser observados na escolha do piloto automático a ser integrado nas aeronaves do CIDIFA. Os requisitos identificados são sumarizados no final do capítulo.

Capítulo 5: são apresentados diferentes pilotos automáticos *closed source* e *open source*. Posteriormente são descritos em maior detalhe os sistemas pré-selecionados para a avaliação comparativa expondo-se as respetivas características técnicas de maior relevo para este trabalho de investigação.

Capítulo 6: é realizada uma análise comparativa dos pilotos automáticos estudados no âmbito desta dissertação, em função dos requisitos operacionais e de aeronavegabilidade anteriormente identificados. Adicionalmente, inclui-se também neste capítulo uma comparação dos sistemas periféricos suportados pelos pilotos automáticos em estudo.

Capítulo 7: é feita a discussão dos resultados obtidos procurando retirar conclusões que permitam responder à pergunta de partida.

Capítulo 8: são apresentadas as conclusões deste trabalho de investigação. São ainda expostas algumas recomendações e sugestões para futuros trabalhos de investigação.

Capítulo 2. Revisão Bibliográfica

2.1 Conceitos UAS e Piloto Automático

Como referido por Austin (2010), um UAS poderá ser modestamente definido como uma aeronave à qual foi removido o piloto e substituído por um computador e um *data link*. Contudo, esta definição é demasiado simplista tendo em conta o contexto atual. Na realidade, estas aeronaves apresentam desafios complexos à engenharia. Desde o desenvolvimento dos primeiros pilotos automáticos em 1912, o aumento da capacidade dos sistemas de bordo, associado ao exponencial crescimento do número de utilizadores destas aeronaves, tem vindo a abrir novos horizontes num espectro alargado de aplicações (HaiYang *et al.*, 2010).

Os UAS operam de facto sem um piloto a bordo da aeronave, mas as suas capacidades ultrapassam esta realidade. Estas plataformas aéreas são controladas por uma ligação rádio (*data link*) e poderão ser programadas para desempenharem missões de empenhamento específico militar como também de cariz civil. Os UAS diferem das tradicionais aeronaves radio-controladas remotamente pois permitem a execução de planos de voo ultrapassando a *line of sight* (LOS) com o utilizador. Estes representam assim sistemas sofisticados que poderão integrar componentes e sensores que se caracterizam pelo seu avanço tecnológico para as ciências aeronáuticas. Apesar de o piloto não estar a bordo da plataforma aérea, este encontra-se no chão num centro de controlo denominado de *Ground Control Station* (GCS). É a partir daqui que se estabelece a via de comunicação com o UAS, quer para enviar atualizações de plano de voo e dados de comando, como para receber dados de telemetria e dos sensores a bordo (Unmanned Aerial Vehicle Systems Association, 2017).

O *Joint Air Power Competence Center* (JAPCC) – Centro de Excelência (CoE) responsável pelo desenvolvimento de conceitos inovadores bem como de soluções e disseminação de doutrina NATO – define o UAS no seu *Strategic Concept of Employment for Unmanned Aircraft Systems in NATO* (2010) como um conjunto de subsistemas, sendo estes: plataforma aérea, *payload*, elemento de comando e controlo, sistema de comunicações, elementos de suporte e elemento humano (ver Figura 2-1).

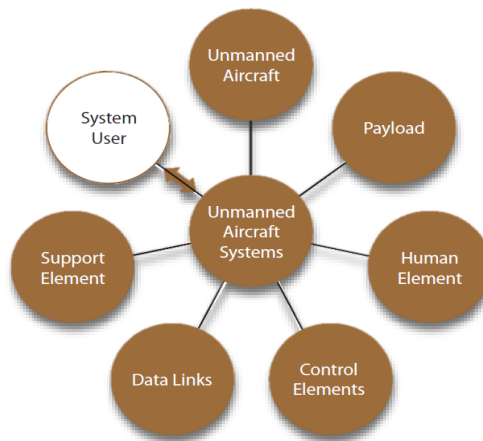


Figura 2-1 - Componentes de um UAS. (Extraído de (JAPCC, 2010), “Figure 1”).

O piloto automático opera interagindo com os diferentes subsistemas. Os dados de voo são recolhidos através de diversos sensores de estado na plataforma e processados (elemento de controlo) de modo a determinar autonomamente quais os comandos nas superfícies de controlo necessárias para o seguimento das referências de voo previamente determinadas. Os dados de telemetria são enviados para a *ground station* através de um *data link* (elemento de comunicações). Na estação de controlo, a partir de um computador onde os dados são interpretados e monitorizados, é possível estabelecer novas referências de navegação (rumo, altitude, velocidade, etc.) para a aeronave. O fluxo de dados encontra-se esquematizado na Figura 2-2.

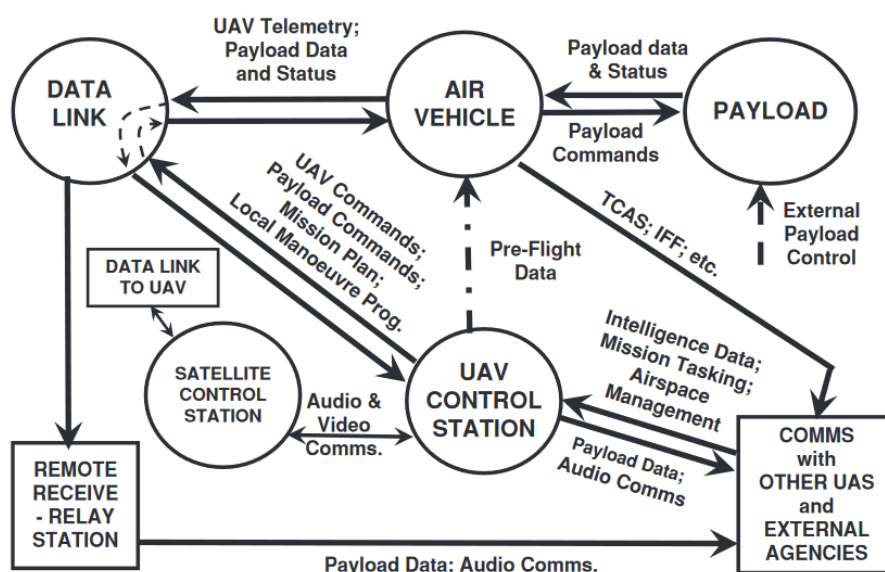


Figura 2-2 - Arquitetura de um sistema UAS (Extraído de (Austin, 2010), “Figure 13.1”).

2.1.1 Sistema de controlo de voo

O piloto automático consiste num sistema composto por *hardware* e *software* concebido para controlar uma plataforma aérea sem intervenção direta de um operador. O seu objetivo é guiar a aeronave por um percurso pré-definido, e permitir o empenhamento do *payload* a bordo. Para tal, o mesmo suporta-se num funcionamento em ciclo fechado que se separa em duas fases, sendo estas: observação de estado e controlo. Na generalidade dos PA, o observador de estado da aeronave possui como principal elemento o sistema inercial. A leitura dos sensores de estado (ver secção 2.1.2), combinada com o sinal GPS, permitem a estimativa da condição da aeronave, sendo esta informação utilizada posteriormente para o controlo do UAS. Este fluxo de dados encontra-se esquematizado na Figura 2-3 (HaiYang et al., 2010).

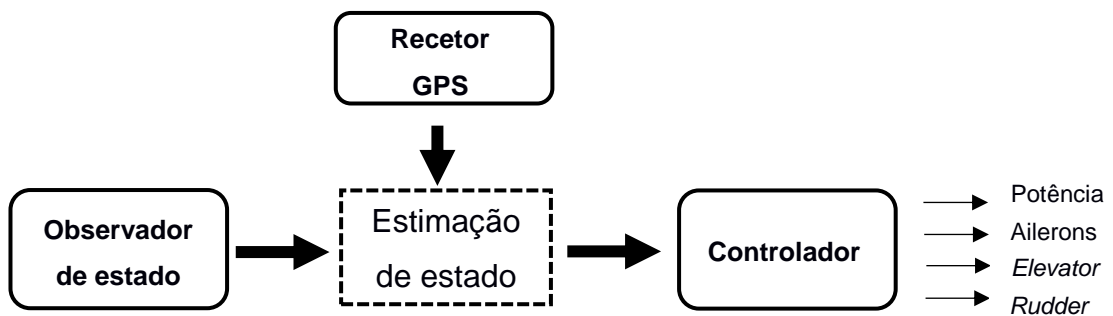


Figura 2-3 - Arquitetura funcional de um piloto automático (Extraído de (HaiYang et al., 2010), “Fig.3”).

O processador é o elemento responsável por estimar o estado da aeronave a partir dos dados recebidos e gerar os *inputs* de controlo necessários para atingir os valores referência.

2.1.2 Sensores de estado

Os sensores de estado tipicamente integrados nos pilotos automáticos são:

1. Recetor GPS – O sinal GPS fornece a posição exata da aeronave e velocidade terreno;
2. Giroscópios – Fornecem velocidade angular;

3. Acelerómetros – Indicam a aceleração da plataforma aérea nos três eixos;
4. Sensores magnéticos – Indicam o rumo da aeronave;
5. Sensores de pressão – Indicam altitude, velocidade e permitem o cálculo da velocidade vertical;

Os sensores giroscópicos e os acelerómetros fazem parte do sistema inercial da aeronave. Estes contribuem com parte da informação necessária para a estimativa da posição e atitude. Adicionalmente a estes sensores, as plataformas aéreas poderão integrar ainda outros periféricos que auxiliam a observação do estado da aeronave permitindo uma maior precisão dos valores adquiridos. Entre esses periféricos encontram-se os altímetros LASER, sensores infravermelhos (IV) e EO. Para aumentar a precisão do sinal de navegação GPS, poderão também ser utilizados os sistemas *Differential Global Positioning System* (DGPS) que permitem aumentar a precisão do sinal de navegação (Marques, 2014).

2.1.3 Arquitetura de comunicações

Apesar de existirem ligeiras diferenças na arquitetura de comunicações entre alguns pilotos automáticos, todos eles seguem o mesmo princípio de funcionamento. O UAS comunica com a respetiva estação de controlo através de uma ligação rádio, enviando pela mesma os dados dos sensores e de telemetria. Estes são por sua vez apresentados ao operador na *ground control station* através de um interface de comando e controlo. Utilizando a ligação com o UAS, o operador poderá atualizar as referências de navegação para o piloto automático. A Figura 2-4 esquematiza a arquitetura das comunicações estabelecidas.

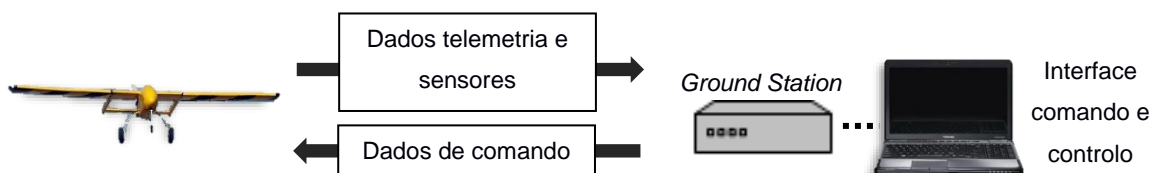


Figura 2-4 - Esquema da arquitetura de comunicações na operação de um UAS.

2.2 Visão estratégica da FA para os UAV

A FA manifestou e concretizou a sua ambição de desenvolver a capacidade UAS através do documento *Visão Estratégica para Sistemas de Aeronaves Não Tripuladas* (MFA 500-12, 2013). Esta publicação define a “orientação estratégica para o desenvolvimento, integração e emprego de UAS na Força Aérea, a fim de preparar as condições para a inserção destes meios aéreos no seu dispositivo operacional” (MFA 500-12, 2013).

Perante a necessidade de explorar a utilização de plataformas não tripuladas, e testar conceitos e procedimentos, encontram-se definidas nessa publicação duas alternativas distintas, porém, possivelmente complementares (MFA 500-12, 2013). A primeira consiste no desenvolvimento dos subsistemas necessários recorrendo a recursos nacionais e tecnologias já disponíveis. Neste ponto insere-se o projeto da construção de um UAS classe II (ver Anexo A). A segunda, reside na aquisição de um sistema já maturado, completo e com fiabilidade reconhecida – UAS classe III – com recurso a concurso público de aquisição internacional (Oliveira, 2014).

Apesar de os requisitos estratégicos e operacionais definidos poderem ser respondidos por uma capacidade UAS nacional (MFA 500-12, 2013), perante as vantagens e desvantagens de cada alternativa afigura-se como possível para a Força Aérea Portuguesa desenvolver ambos os modelos. Ainda que seja possivelmente mais difícil e desafiante, a opção de desenvolver a capacidade UAS com recursos próprios apresenta algumas vantagens em oposição às opções de aquisição ou *leasing*. Em particular, tal permite a obtenção de *know how* e maior controlo sobre a fase de produção tendo em conta os requisitos pré-estabelecidos (Oliveira, 2014). O desenvolvimento deste tipo de plataformas permite ainda a expansão e valorização da Base Tecnológica e Industrial de Defesa (BTID) acompanhando esta a indústria europeia de defesa (Vicente *et al.*, 2013).

O órgão da FA vocacionado para as atividades de desenvolvimento das plataformas autónomas e da capacidade UAS é o CIDIFA. Este organismo executa as atividades de investigação e desenvolvimento (ID) resultantes da *Estratégia de ID de Defesa* promovendo projetos que respondam às lacunas identificadas nas capacidades militares da FA. Sendo o centro de referência nacional na área dos UAS, liga neste âmbito a FA, os outros ramos das FFAA, a Direção-Geral de Armamento e

Infraestruturas de Defesa (DGAID), as entidades do sistema científico nacional e as agências de investigação e tecnologia internacionais (FAP, 2017).

Desde 1996 que a FA, através da Academia e dos seus centros de investigação, colabora ativamente em projetos nacionais e internacionais de investigação e desenvolvimento no âmbito dos UAS. Desses projetos, destacam-se o PITVANT, o PERSEUS, o SEAGULL e o SUNNY (Morgado, 2016).

A visão estratégica da FA contempla como próximo passo na integração de UAS na FA o desenvolvimento de uma plataforma classe II. A Figura 2-1 apresenta o *roadmap tentativo* retirado do MFA 500-12 que estipula o percurso desejável para o desenvolvimento da capacidade UAS na FA.

Tabela 2-1 - Roadmap tentativo da edificação de capacidade UAS nacional (Extraído de (MFA 500-12, 2013), "Tabela 5-II").

<i>Atividade</i>	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Desenvolvimento e maturação de protótipos Classe II	AFA							
Estabelecimento de parcerias com indústria e transferência de tecnologia		GT						
Produção de UAS Classe II								
Coordenação e implementação		GT						
IOC UAS Classe II				CA				
FOC UAS Classe II						CA		
UAS Classe III em LPM								
Processo de aquisição								
Aquisição de UAS Classe III								
IOC UAS Classe III								CA

Contudo, o trabalho desenvolvido pelos centros de investigação da FA procura dar resposta a um conjunto abrangente de projetos de investigação com diferentes objetivos. Para tal, são desenvolvidas as soluções mais adequadas aos objetivos de cada projeto, tendo em conta os meios financeiros e tecnológicos que se encontram disponíveis. Por esta mesma razão, os requisitos e exigências definidos nesta dissertação não serão atribuídos exclusivamente para uma plataforma classe II, mas para um conceito mais abrangente, sendo aplicáveis tanto a aeronaves da classe II

como de menor dimensão (onde se incluem atualmente todos os UAS ao serviço da FA).

Capítulo 3. Requisitos Operacionais

Neste capítulo são identificados os requisitos operacionais que irão mais tarde ser utilizados para avaliar os pilotos automáticos pré-selecionados. Devido ao facto de estes requisitos terem sido definidos para a edificação de uma capacidade UAS, no final são sumarizados aqueles que se aplicam ao objeto de estudo.

Os requisitos operacionais são produto da visão e estratégia de defesa do país. Deste modo, seguidamente é feita uma abordagem genérica das perspetivas de empenhamento dos UAS por parte dos principais utilizadores.

A política de Defesa Nacional segue os princípios, orientações e objetivos presentes na Constituição, na Lei de Defesa Nacional (LDN), no programa do Governo e no CEDN (*Lei n.º 31-A/2009*, 2009). As políticas de segurança e defesa nacional encontram-se elaboradas de modo a garantir o cumprimento dos objetivos permanentes nacionais sendo estes “a defesa dos valores constitucionais, a garantia da soberania, da independência nacional e da integridade territorial, a segurança dos cidadãos e a sua liberdade individual e política...” (CEDN, 2013). O CEDN apresenta algumas das missões e capacidades previstas para as FFAA (Pais, 2013). Na Tabela 3-1 destacam-se algumas dessas missões e capacidades:

Tabela 3-1 - Excerto de missões atribuídas às FFAA (Extraído de (CEDN, 2013)).

“Garantir a capacidade de vigilância e controlo do território nacional e do espaço interterritorial, incluindo a fiscalização do espaço aéreo e marítimo” (CEDN, 2013).
“(...) racionar os meios e as instituições envolvidas na vigilância (...) maximizando as capacidades existentes e melhorando a eficiência no emprego dos meios.” (CEDN, 2013).
Cumprir missões de “Interesse público, associadas ao desenvolvimento sustentado, ao bem-estar da população, ao apoio à proteção civil e aos compromissos internacionais assumidos neste domínio;” (CEDN, 2013).
“Promover a investigação, o desenvolvimento e a inovação como passo fundamental para o fomento de um nível tecnológico elevado no sector de defesa,

que melhore a operacionalidade das Forças Armadas e o desenvolvimento continuado de uma Base Tecnológica e Industrial de Defesa (BTID), (...)" (CEDN, 2013).

Observando os objetivos dispostos relativamente às capacidades de vigilância e fiscalização, bem como ao apoio à segurança civil em Outras Missões de Interesse Público (OMIP), intui-se como as plataformas autónomas poderão ser um recurso benéfico. Devido a este mesmo facto, a capacidade UAS nacional e o seu valor operacional são já tidos em consideração no presente. Observe-se por exemplo, o Conceito de Operações para Reconhecimento e Vigilância que já contempla a utilização destas aeronaves como elementos complementares (MFA 500-11, 2012).

Em Portugal, os potenciais utilizadores principais de plataformas autónomas são os três ramos das FFAA, bem como as FFSS e outras entidades privadas e públicas que se destaquem nas áreas de pesquisa científica, topografia e fotografia (Oliveira, 2014) (ver Tabela 3-2). Sob o objetivo de desenvolver uma capacidade UAS nacional, adaptada aos seus utilizadores e que responda às ações estratégicas definidas para o país, é assim necessário observar as perspetivas de emprego operacional e decorrentes requisitos.

Considerando os requisitos publicamente manifestados pela Guarda Nacional Republicana (GNR) (Chiote, 2012), e Polícia de Segurança Pública (PSP) (Alfaro, 2015), e sabendo que o emprego de sensores eletro-óticos multiespectrais, capazes de transmissão em tempo real – *Near Real Time* (NRT) – satisfaz a maioria dos seus requisitos, é possível afirmar com elevado grau de confiança que os requisitos definidos pelos ramos das FFAA também abarcarão as exigências das forças de segurança (Oliveira, 2014). Deste modo, nos próximos parágrafos desta dissertação serão abordados os diferentes requisitos definidos pelos respetivos ramos das FFAA.

Tabela 3-2 - Aplicações de um UAS nacional (Extraído de Vicente (2013)).

Entidade Beneficiária		Tipologia de aplicações	
Defesa	FFAA	Operações Militares	ISTAR
			Proteção da Força
			Deteção NRBQ
			Relé de comunicações
			Guerra eletrónica
		Outras Missões de Interesse Público	Apoio na busca e salvamento
			Fiscalização da ZEE
			Pesquisa dos recursos naturais
			Vigilância de pescas
			Colaboração com FSS na vigilância e reconhecimento de atividades ilícitas
		Colaboração em atividades de controlo e proteção ambiental	
Administração Interna	GNR PSP SEF ANPC ANSR	Manutenção da ordem pública	
		Proteção ambiental	
		Combate ao narcotráfico e imigração ilegal	
		Vigilância e Controlo de fronteira marítima	
		Seguimento e Vigilância de objetivos de investigação policial	
		Apoio a Operações Policiais	
		Proteção das forças de segurança	
		Gestão do apoio a situações de crise e Proteção Civil	
		Gestão de tráfego rodoviário	
		Planeamento civil de emergência	
		Segurança de grandes eventos	
		Segurança de instalações de áreas sensíveis	
		Busca de desaparecidos	
		Deteção remota, monitorização e apoio ao combate e rescaldo de incêndios	
Justiça	Polícia Judiciária	Combate ao narcotráfico	
		Investigação criminal	
Agricultura, Mar, Ambiente e Ordenamento do Território	Serviços centrais de administração direta e indireta do estado	Monitorização da poluição atmosférica e marítima	
		Controlo do tráfego marítimo	
		Fotografia e Cartografia aérea	
		Planeamento urbanístico e ordenamento do território	
		Controlo e preservação do património natural	
		Fiscalização e Controlo das atividades de pescas	
		Monitorização de culturas	
Controlo cinético			
Educação e Ciência	SCTN	ID	
		Aplicações científicas	
Economia	Cluster Aeronáutico Nacional	Aplicações adicionais com interesse para a indústria/exportação	
		Monitorização das redes de distribuição de gás e petróleo	
		Monitorização das infraestruturas de redes elétricas e eólicas	
		Monitorização das redes viárias e ferroviárias	
		Retransmissão de comunicações	
Prospecção petrolífera			
Serviços de Informações	SIED/SIS	Seguimento de alvos e monitorização de "pattern of life"	

3.1 Espetro de missões da Força aérea

Por forma a orientar o desenvolvimento de um UAS que possa ser integrado no dispositivo operacional, a FA definiu requisitos operacionais que deverão ser seguidos. Estes mesmos requisitos encontram-se dispostos no MFA 500-12 onde são também abordados os contextos onde as plataformas poderão ser inseridas.

De acordo com a *Visão Estratégica para Sistemas de Aeronaves Não Tripuladas* da FA, a operação dos UAS irá ao encontro de quatro missões principais, sendo estas: observação tática, vigilância marítima próxima, operação em binómio ar-ar e intervenção em Missões de Interesse Público (MIP). As próximas secções descrevem de forma sucinta cada uma delas e como as plataformas autónomas se inserem nas mesmas.

3.1.1 Observação Tática

Os primeiros UAS surgem na História da Aeronáutica como recursos para vigilância e observação das forças inimigas a partir de uma posição privilegiada (Pereira, 2016). A observação tática constitui-se como uma das missões que impulsionou o surgimento dos UAS. As plataformas não tripuladas, não expondo nenhum operador a um risco direto, permitem maiores tempos de permanência sobre os objetivos e a sua miniaturização possibilita que sejam empregues em cenários de batalha convencionais, sendo por exemplo utilizados por um soldado para uma observação “*over the hill*” (Vicente, 2011). Na Figura 3-1 expõe-se o *AeroVironment RQ-11B Raven*, um UAS de vasta utilização nos teatros da atualidade para este mesmo efeito.



Figura 3-1 - AeroVironment RQ-11B Raven (esquerda) e um militar do Exército dos Estados Unidos em campanha a lançar a aeronave (direita) (Extraído de (AeroVironment, 2017)).

No contexto da FA, os UAS são de igual modo boas estruturas de suporte para a operação dos *Forward Air Controller* (FAC), permitindo a identificação, seguimento e designação de alvos, bem como para BDA. Ainda na esfera da observação tática incluem-se as operações de vigilância próxima, noturna e diurna, de perímetros militares ou instalações protegidas. Estas mesmas missões poderão ser executadas por plataformas simples e de reduzidas dimensões (MFA 500-12, 2013).

3.1.2 Vigilância marítima próxima

As operações de vigilância marítima caracterizam-se pela necessidade de grande autonomia e alcance por parte das plataformas aéreas (MFA 500-12, 2013). Nestes cenários de operação, estando o UAS equipado com sensores EO, recetor *Automatic Identification System* (AIS), equipamentos radar, e preparado para operar a partir de estações de lançamento projetáveis, o mesmo será um bom recurso para operações de vigilância (MFA 500-12, 2013). Devido a este mesmo facto, o emprego operacional dos UAS neste contexto surge como uma resposta válida para complementar as aeronaves tripuladas (Pereira, 2016).

3.1.3 Busca e Salvamento

Aliadas às missões de vigilância marítima próxima surgem as missões de busca e salvamento. Estas são executadas com o propósito de salvaguardar a vida humana, fornecendo um serviço de busca e salvamento marítimo e aeronáutico a quem necessitar (*Esquadra 751*, 2016). A *Search Rescue Region* (SRR), área de responsabilidade SAR incumbida a Portugal, constitui-se como a maior europeia. Neste sentido, a contribuição das plataformas autónomas poderá ser uma mais valia para auxiliar as aeronaves tripuladas nestas missões que se caracterizam pelo alargado período de operação. Ainda assim, devido à complexidade deste tipo de missão, que poderá implicar voar em condições meteorológicas adversas e a grandes distâncias de costa, a contribuição dos UAS poderá ser limitada (Pereira, 2016). A intervenção dos UAS no âmbito SAR surge assim no vetor de complementaridade das aeronaves tripuladas. As tripulações experienciam dificuldades de comunicação com estações terrestres num raio de ação superior a 100 milhas náuticas (Pereira, 2016).

No sentido de colmatar esta lacuna, os UAS poderão ser utilizados como relé de comunicações permitindo uma coordenação em tempo real com as estações terrestres (Pereira, 2016).

3.1.4 Operação em binómio ar-ar

O empenhamento de binómios ar-ar acontece em duas esferas de operações diferentes. Uma designa-se *deployment* e a outra refere-se ao âmbito de operação.

A área de *deployment* prende-se com a projeção das plataformas não tripuladas. Neste campo assume principal relevância o facto da plataforma não tripulada poder ser integralmente transportada por uma outra aeronave para uma área remota não preparada, e poder ser operada a partir desse mesmo local.

Na outra esfera de operação do binómio ar-ar, o UAS será utilizado como extensão dos sensores da aeronave que integra a bordo a *ground control station*. Deste modo, a aeronave tripulada, como por exemplo o EH101 ou o C295M, ampliarão o seu alcance de operação (MFA 500-12, 2013).

3.1.5 Outras missões de interesse público

As capacidades e valências desenvolvidas nos UAS constituem-se como atributos importantes para missões de interesse público. As plataformas autónomas poderão ser utilizadas em missões como deteção e vigilância de incêndios florestais, eventos de poluição marítima e ainda nouro tipo de projetos que contribuam para a área científica. Estas aeronaves seriam também um contributo valioso em operações como Fiscalização e Vigilância de pescas bem como colaboração com as Forças de Segurança na vigilância e reconhecimento de atividades ilícitas.

3.2 Requisitos operacionais de referência da Força Aérea

Tendo em consideração a perspetiva de empenhamento operacional dos UAS por parte da FA, foram identificados no MFA 500-12 um conjunto de requisitos operacionais de referência. Estes requisitos foram discriminados tendo em conta as

exigências das missões estritamente militares, considerando ambientes operacionais de baixa complexidade e semi permissivos, as exigências das MIP, e ainda as de vigilância e reconhecimento da área de interesse nacional (MFA 500-12, 2013).

Deste modo, e como descrito no MFA 500-12, os requisitos base a ter em consideração são os seguintes:

1. Alcance rádio da ordem das 90 milhas náuticas;
2. Gama de altitude de operação entre os 5.000 e os 15.000 pés;
3. Autonomia não inferior a nove horas, na configuração preparada para vigilância marítima;
4. Velocidade de cruzeiro superior a 60 nós, e velocidade de busca/*loiter* preferencialmente adaptável até um limite inferior de 45 nós;
5. Equipamento de aeronavegabilidade compatível com os requisitos que vierem a ser estabelecidos para operar em espaço aéreo não segregado;
6. O *payload* permanente deverá incluir um sensor eletro-ótico de média-alta resolução nas gamas do espectro visível e infravermelho, com capacidade de controlo e transmissão em tempo real;
7. O *payload* configurável e modular deverá incluir um radar de abertura sintética de curto alcance e um recetor AIS;
8. Será desejável vir a dispor de módulos com designador laser e retransmissor rádio multifrequência;
9. Capacidade para aterrar e descolar sob ventos de frente com 25kts ou com componente cruzada de 15kts;
10. Capacidade para operar sujeito a condições transitórias de precipitação, turbulência e formação de gelo ligeiras;
11. O quantitativo de aparelhos preconizado é de quatro: dois para operações, um para treino e formação, e um para reserva, destacamento, manutenção ou investigação, devendo o número de *ground-stations* fixas e móveis necessárias ser igual, de forma a dispor de opções de operação centralizada e descentralizada.

A bibliografia existente sobre este objeto de estudo é vasta. Como tal, no âmbito desta dissertação foram também tidos em consideração os requisitos operacionais

indicados por outros trabalhos de investigação. Em particular, de acordo com Pereira (2016), deverão de igual forma ser ponderados os seguintes requisitos:

1. O sistema de navegação deverá ter por base uma combinação de sistemas de navegação inercial e por satélite (INS/GNSS);
2. O sistema de navegação deverá ser capaz de realizar aproximações utilizando rádio ajudas (TACAN/VOR/ILS);

3.3 Espectro de missões da Marinha e Exército

Ainda que exista e seja expresso o interesse das diferentes organizações e instituições militares nacionais em obter e desenvolver uma capacidade UAS, excluindo pequenos projetos que envolveram entidades comerciais e a colaboração entre ramos das FFAA e algumas FFSS, não tem sido possível iniciar um processo de geração conjunto de capacidade. Por iniciativa da ex-DGAIED (Direção Geral de Armamento e Infra-Estruturas de Defesa) foram realizadas reuniões entre os ramos das FFAA e representantes da indústria nacional com o objetivo da geração de uma capacidade UAS nacional integrada. Nestes eventos, a Marinha e o Exército referiram a existência de grupos de trabalho, porém ainda sem resultados consubstanciados que permitissem perspetivar as respetivas capacidades. Ainda assim, estes ramos têm vindo a referir publicamente as suas necessidades específicas e potenciais requisitos operacionais (Oliveira, 2014). Nas secções seguintes observam-se estes mesmos requisitos apontados nestas reuniões e também em seminários realizados no Instituto de Estudos Superiores Militares (IESM) em 2009 e 2010, onde foram de igual forma enunciados alguns indicadores da ambição dos utilizadores nas áreas de segurança e defesa nacional (Vicente, 2013).

3.3.1 Requisitos operacionais de referência da Marinha

De acordo com Vicente (2013), baseando-se em Gonçalves (2009) e Miranda (2010), os UAS serão utilizados e empregues como elementos constituintes do sistema ISTAR (*Intelligence, Surveillance, Target Aquisition and Reconnaissance*) marítimo nacional, em missões de carácter militar e não militar.

Para o cumprimento destas mesmas missões, foram definidos os seguintes requisitos e capacidades operacionais:

1. Troca de dados com outros sistemas de informação;
2. Lançamento e recuperação a partir de navios;
3. Envio da informação a utilizadores específicos e em formato apropriado;
4. Capacidade para realizar deteção, localização, identificação, reconhecimento e verificação.

3.3.2 Requisitos operacionais de referência do Exército

O Exército apresenta também variadas missões nas quais a utilização de UAS confere uma vantagem operacional. Como afirmado por Vicente (2013), suportado em Patrício (2009) e Oliveira (2010), estas plataformas seriam empregues em missões de reconhecimento e vigilância em MIP, em cenários de guerra convencional contribuindo para a defesa coletiva e em Operações de Resposta a Crises (ORC).

Os requisitos operacionais distinguidos para o cumprimento destas missões são:

1. Lançamento e recuperação a partir de plataformas móveis;
2. Troca de dados com outros sistemas de informação;
3. Integração no sistema ISTAR do Exército, nacional e combinado;
4. Comunicação segura de dados recolhidos aos utilizadores;
5. Capacidade para missões de vigilância, reconhecimento e apoio às atividades de referenciação, designação de alvos e avaliação de danos;
6. Observação e reconhecimento aéreo contínuo a áreas de operações de forças terrestres;
7. Reconhecimento, localização, identificação e seguimento de veículos ou pessoas em ambiente diurno ou noturno.

3.4 Resumo dos requisitos operacionais

Dado o objetivo e contexto da presente dissertação, alguns dos requisitos anteriormente apresentados não são diretamente aplicáveis a este trabalho de

investigação. Adicionalmente, a distinção entre requisitos operacionais e de aeronavegabilidade nem sempre se encontra perfeitamente definida, sendo ambos indistintamente estabelecidos. Noutras situações, os requisitos indicados referem-se a diferentes sistemas dos UAS como ao *payload* a ser integrado na aeronave. Observe-se o exemplo da capacidade de seguimento de alvos presente no requisito 4) da Marinha e 7) do Exército. O cumprimento desta exigência encontra-se dependente do desempenho do sensor eletro-ótico que integra a plataforma. Sendo o objeto de estudo desta dissertação o piloto automático, neste trabalho de investigação analisar-se-á se este suporta periféricos para executar o tipo de missões identificadas. O sensor, as suas propriedades e características que possibilitam a realização de determinadas tarefas estão fora do âmbito desta dissertação. Deste modo, os requisitos que definem/estabelecem as capacidades dos sensores foram adaptados ao objeto de estudo, determinando-se não o cumprimento da capacidade, mas a potencialidade para a inclusão de tais elementos periféricos. Devido à pertinência deste tema para o objetivo deste estudo, a inclusão de sistemas periféricos será analisada com maior detalhe no Capítulo 6.

A Tabela 3-3 apresenta o resumo dos requisitos operacionais identificados tendo em conta as publicações de referência. Estes serão utilizados numa fase posterior para a avaliação comparativa dos pilotos automáticos em estudo no âmbito desta dissertação.

Tabela 3-3 - Requisitos Operacionais (Extraídos de (MFA 500-12, 2013) e (Vicente, 2013)).

Requisitos	Referências
(1) Alcance rádio	90 n.m.
(2) Bloco de Operação	5.000'-15.000'
(3) Autonomia VIMAR	≥9 Hrs
(4) Velocidade Cruzeiro	>60 Kts
(5) Velocidade busca/loiter	>45 Kts
(6) Integração de <i>Payload</i>	

(7) Lançamento e aterragem em plataformas móveis	
(8) Aterrar com componente vento frontal	≤ 25 Kts
(9) Aterrar com componente vento cruzado	≤ 15 Kts
(10) Operação com precipitação transitória	
(11) Operação com turbulência transitória	
(12) Condições de formação de gelo ligeiras	
(13) Sistema Navegação Integrado	INS/GNSS
(14) Aproximações por rádio ajudas	
(15) Troca de dados com outros sistemas de informação de forma segura.	

Capítulo 4. Aeronavegabilidade

O termo aeronavegabilidade é um conceito fundamental no contexto da aviação. O fórum *Military Airworthiness Authorities* (MAWA), estabelecido em 2008 pela *European Defense Agency* (EDA) para a coordenação de doutrina e procedimentos de certificação entre os países membros, define aeronavegabilidade como : “*The ability of an aircraft, or other airborne equipment or system, to operate in flight and on ground without significant hazard to aircrew, ground-crew, passengers (where relevant) or to other third parties*” (EDA, 2013).

A aeronavegabilidade é uma garantia de que a aeronave cumpre com os requisitos de segurança necessários para operar sem colocar os operadores ou terceiros em risco. O cumprimento dos requisitos é reconhecido através de um Certificado de Aeronavegabilidade. Este é atribuído a cada número de cauda garantindo o cumprimento de requisitos de concepção e produção (Farto, 2016).

4.1 Enquadramento Legal

Um dos maiores desafios para a integração dos UAS em espaço aéreo não segregado reside na capacidade de aplicar a legislação em vigor e no processo de demonstrar a sua correta verificação.

Para que uma plataforma de voo autónomo seja integrada no espaço aéreo de uma área não reservada de forma segura, terão de ser regulados vários aspetos da sua operação. Partindo das áreas mais ligadas à tecnologia aeronáutica como os sistemas “*Detect, Sense and Avoid*”, culminando nas questões morais do emprego e utilização deste tipo de aeronaves, todas terão de cumprir com regulamentos de diferentes áreas que permitam a sua certificação (Leandro, 2013). Os múltiplos esforços de regulamentação podem ser agrupados em três campos principais: as regras de navegação aérea, as normas de certificação aeronáutica e as normas de operação e sustentação (qualificação de operadores) (Rossa, 2011).

De modo a que se possa prosseguir no sentido do desenvolvimento de uma capacidade UAS completamente integrada no espaço aéreo nacional, será necessário rever a legislação existente e atuar segundo o que está vertido nas leis nestes três

campos. A certificação de operadores de UAS militares foi já investigada por Leandro (2013). Por outro lado, as regras de navegação são semelhantes às aplicadas nas aeronaves tripuladas. De modo a que se dê continuidade ao processo de integração destes sistemas, resta assim o estudo e análise do quadro regulamentar aplicável à certificação de UAS.

Na Europa, a EASA (*European Aviation Safety Agency*) apresenta-se como a entidade responsável pelos regulamentos relativos a regras comuns e para certificação das aeronaves. Ainda assim, e como descrito no artigo 1º do Regulamento (CE) nº 2016/2008 que cria esta entidade, “*O presente regulamento não se aplica nos casos em que os produtos, as peças, os equipamentos, as pessoas e organizações referidas no nº1 sejam utilizados em serviços das forças armadas, aduaneiros, policiais ou afins.*”. Esta entidade detém apenas no seu âmbito de aplicação as organizações civis, e como tal, não produz regulamentação aplicável às plataformas autónomas para fins militares (Rossa, 2011).

A *European Defence Agency* (EDA) assume uma postura abrangente procurando mitigar a ausência de legislação aproximando cooperativamente os atores institucionais e industriais europeus (Vicente, 2011). Os *European Military Airworthiness Requirements* (EMAR), como o EMAR 21 “*Certification of Military Aircraft and Related Products, Parts and Appliances, and Design and Production Organizations*” surgem com este mesmo propósito, procurando a uniformização por parte dos países membros do MAWA. Contudo, a EDA não possui capacidade de regular, sendo as suas publicações e documentos apenas princípios orientadores e publicações de referência para a ação dos Estados Membros (Farto, 2016).

A entidade nacional responsável pela certificação de aeronavegabilidade de aeronaves militares é a Autoridade Aeronáutica Nacional (AAN) (Farto, 2016). Segundo a lei nº 28/2013 de 12 de abril, onde se definem as competências, estrutura e funcionamento desta entidade, institui-se também que o CEMFA é, por inerência, a AAN.

Em 2013, através da emissão da Circular Nº1/2013, a AAN definiu os requisitos para a emissão de Licenças Especiais de Aeronavegabilidade (LEA) para UAS. A finalidade deste documento consiste em estabelecer os requisitos para a emissão de LEAs para este tipo de plataformas no domínio da Defesa Nacional. As LEA

confirmam que um determinado UAS se encontra em conformidade com os requisitos da AAN, porém, estas são apenas válidas para as finalidades solicitadas, não sendo permanentes. Estas licenças procuram mitigar a ausência de um quadro regulamentar para a obtenção de *Type Certificate* (TC) para as plataformas autónomas (Gonçalves, 2016). O processo de certificação de aeronavegabilidade é assim substituído por um de permissão para voo (AAN, 2013).

Portugal, inserindo-se numa organização multinacional militar – NATO – mantém como pilar da sua operação, semelhante aos outros países membros, a interoperabilidade. As capacidades desenvolvidas, ainda que adquiridas individualmente pelas diferentes FFAA devem ser equivalentes e compatíveis entre si. Apenas deste modo será possível a integração de cada força em missões NATO, nas quais o conceito *operação conjunta e combinada* é tão escrupulosamente cuidado. Este mesmo princípio requer assim um esforço e trabalho para que exista uma padronização de doutrina e procedimentos (Vicente, 2011). No seguimento deste objetivo foram constituídos, por parte da NATO, os *Working Groups* (WG). Estes são responsáveis pela redação de *Standardization Agreements* (STANAG) onde se definem os conceitos, procedimentos e técnicas de operação a serem tomados pelas FFAA dos países membros.

No âmbito de aeronavegabilidade, a NATO publicou o STANAG 4703 – *Light Unmanned Aircraft Systems Airworthiness Requirements* - e o STANAG 4671 – *UAV Systems Airworthiness Requirements*, produzido pelo *Flight in Non-Segregated Air Space Working Group* (FINAS). Estes são os documentos que padronizam os requisitos de aeronavegabilidade dos UAS para as Forças Armadas dos estados membros. O primeiro refere-se a aeronaves não tripuladas com um peso máximo à descolagem (MTOW) inferior a 150 kg. O segundo refere-se às plataformas de voo autónomo com um MTOW superior a 150 kg. Portugal já procedeu à ratificação de ambos os STANAG (Gonçalves, 2016).

O STANAG 4703 contém os requisitos técnicos mínimos para a certificação de aeronavegabilidade de um UAS com um peso máximo à descolagem inferior a 150 kg e uma energia de impacto superior a 66 J que se pretenda operar num espaço aéreo não segregado. Devido à grande variedade de configurações e níveis de tecnologia encontrados nos UAS nesta categoria, este STANAG foi redigido seguindo três

objetivos, sendo estes: estabelecer um mínimo de requisitos que assegurem a aeronavegabilidade da plataforma, minimizar configurações que possam ser perigosas e permitir ainda alguma flexibilidade na medida em que o documento se dirige aos problemas endereçados e não às soluções que deverão ser tomadas. O STANAG 4703 está na base da identificação dos requisitos de aeronavegabilidade considerados nesta dissertação. Note-se que estes requisitos serão igualmente aplicáveis no caso de aeronaves de maior MTOW (como o caso de um UAS classe II) e desta forma tal não constitui uma limitação às conclusões deste trabalho.

4.2 Requisitos de Aeronavegabilidade

Os requisitos identificados como aplicáveis no âmbito deste trabalho de investigação foram divididos nas respetivas áreas funcionais, tendo em conta a organização do STANAG 4703.

Sistemas e equipamentos

1. A precisão mínima necessária para cada dispositivo utilizado para controlar a trajetória do UAV e para adquirir dados de navegação deve ser estabelecida pelo fabricante e ser compatível com os requisitos para o UAV;
2. Qualquer equipamento cuja falha possa levar a perda de funções ou interpretação errada de dados de navegação, resultando em efeitos nocivos e catastróficos para a segurança, tem de ter um sistema de “*Fault Detection*” ou capacidades de isolamento da falha reconhecidas pela Autoridade Certificadora;
3. O recetor de sinal GPS deverá ter, no mínimo, um *Built-In-Test* que testará a indicação de falha de receção do sinal;
4. Cada subsistema do UAS que afete a operação do mesmo deve cumprir a sua função em todos os cenários previstos e identificados pela entidade operadora.

Data Link de Comando e Controle

1. O UAS terá de incluir um *data link* de comando e controle para controle da plataforma com as seguintes funções:
 - 1.1. Transmissão de comandos da estação de controle para o UAS (*Uplink*);
 - 1.2. Transmissão de dados de voo do UAS para a estação de controle (*Downlink*).

2. O *data link* de comando e controle tem de ser:
 - 2.1. Eletronicamente compatível (EMC) com outra estação de controle;
 - 2.2. Eletronicamente compatível com o equipamento do UAS;
 - 2.3. Protegido contra interferência eletromagnética (EMI) e vulnerabilidade eletromagnética (EMV).

Performance Data link:

1. Devem ser emitidos sinais de aviso para alertar o operador do UAS para a degradação do sinal *data link*, como por exemplo em situações de aproximação a atitudes da aeronave que ocultem as antenas, aproximação de raio máximo de ação ou aproximação de antenas exteriores que provoquem interferência;

2. Em caso de perda do sinal do *data link*, um processo automático de reaquisição do sinal terá de entrar em ação num intervalo de tempo definido com a autoridade de certificação;

3. Em caso de falha de reaquisição de sinal:
 - 3.1. Um alerta terá de ser emitido, podendo ser visual, audível ou ambos, de modo a avisar o operador;
 - 3.2. O alerta deverá permanecer até ser terminado pelo operador.

Ground Station

1. A interface entre o operador e a plataforma deve facilitar o cumprimento das missões em todas as condições a que possa estar sujeita. Deverá ser dada particular importância à disposição da informação e à facilidade com que a mesma poderá ser consultada. O risco de utilização incorreta ou interferência de comandos deverá ser minimizado.

Informação de voo

1. Os dados de voo e de navegação a serem apresentados obrigatoriamente na estação de controlo, e a um ritmo de atualização que não coloque em risco uma operação segura, são:
 - 1.1. *Indicated airspeed*;
 - 1.2. Velocidade terreno;
 - 1.3. Altitude de pressão e respetivo acerto altimétrico;
 - 1.4. Rumo;
 - 1.5. A posição do UAV num mapa a uma escala seleccionável pelo operador, conjunta com a indicação do desvio entre o percurso terreno planeado e o voador;
 - 1.6. A posição relativa ao transmissor/recetor em LOS (*Line of Sight*), indicada em distância, radial e altitude;
 - 1.7. Em operação de modos semiautomáticos, os parâmetros de voo e navegação enviados para a plataforma terão de ser apresentados;
 - 1.8. Limites mínimos e máximos de velocidade;
 - 1.9. Atitude;
 - 1.10. Velocidade Vertical;
 - 1.11. Estado do sistema de Navegação;
 - 1.12. Dados do *G-Meter*.

Descolagem e Lançamento

1. Quando o sistema de descolagem automática está disponível:

- 1.1. Não pode causar oscilações continuadas que ponham em causa a segurança ou contrariar o controlo da atitude da plataforma devido à alteração da configuração da aeronave, diferentes exigências de propulsão ou outros distúrbios naturais e resultantes deste momento de operação;
- 1.2. Estando o UAS preparado para descolagens convencionais numa pista, o mesmo deverá incorporar um sistema de aborto à descolagem. Esta função deve ser iniciada facilmente pelo operador, até à velocidade máxima de aborto, e deverá ser capaz de imobilizar a plataforma na pista.

Precisão de navegação

1. A precisão de navegação deve ser acordada com a Autoridade Certificadora e verificada num voo de teste nos parâmetros de máximo erro em desvio, altitude e velocidade em relação a um waypoint pré-estabelecido.
2. A informação sobre a precisão de navegação deverá ser apresentada ao operador.
3. Em modos de voo automático ou semiautomático, um aviso de desvio da rota definida terá de ser apresentado e executado o procedimento de recuperação em casos de desvio excessivo. O desvio máximo deverá ser acordado com a Autoridade Certificadora.

Aterragem

1. Quando o sistema de aterragem automática é providenciado:
 - 1.1. Não pode causar oscilações continuadas que ponham em causa a segurança ou contrariar o controlo da atitude da plataforma devido à configuração a ser utilizada, às diferentes exigências de propulsão ou outros distúrbios naturais e resultantes deste momento de operação.

- 1.2. Estando o UAS preparado para aterragens convencionais numa pista, o mesmo deverá incorporar um sistema de aborto à aterragem. Este sistema deve ser iniciado facilmente pelo operador de modo a que seja iniciado o procedimento de *go-around*.

Controlabilidade e manobrabilidade

1. O sistema de controlo de voo (FCS), incluindo sensores, atuadores, computadores e todos os elementos necessários para o controlo de atitude, velocidade e trajetória, deverão ser projetados para providenciar controlo da plataforma nos seguintes modos de operação:
 - 1.1. Automático: A atitude, velocidade e rota do UAV são totalmente controlados pelo FCS. Não são necessários inputs do operador nem da estação de controlo à exceção nos casos de modificações ou atualizações aos planos de voo;
 - 1.2. Semiautomático: O operador controla os valores de velocidade, rumo e altitude. O FCS opera os atuadores da plataforma de modo a obter os parâmetros solicitados pelo operador;
 - 1.3. Manual: O operador controla diretamente os atuadores da plataforma. Este tipo de controlo poderá estar limitado a algumas fases do voo como a descolagem, aterragem e em condições de emergência, como acordado com a autoridade certificadora.
2. Deverá haver uma indicação clara e inequívoca na estação de controlo que indique, ao operador do UAV, o modo de operação do FCS.
3. O UAV deverá ser controlável e manobrável em segurança em todos os modos de operação do FCS, nas condições de operação mais severas dentro dos limites da aeronave, e em todas as fases de voo.

Trim

1. O FCS deverá utilizar *Trim* de modo a que mantenha o máximo de controlo e que as características dinâmicas e margens de segurança não sejam comprometidas.

Capacidade de recuperação de emergência

1. O UAV terá de integrar um sistema de recuperação de emergência. Este deverá consistir numa de duas opções possíveis, ou a combinação das mesmas:
 - 1.1. Um sistema ou função que termine o plano de voo imediatamente e cesse a missão planeada;
 - 1.2. Um procedimento de recuperação de emergência iniciado por comando dos operadores ou por uma sucessão específica de eventos.
2. A capacidade de recuperação de emergência deverá funcionar como desejado em todo o envelope de voo, mesmo estando a plataforma sujeita a severas condições atmosféricas.
3. A capacidade de recuperação de emergência terá de estar salvaguardada de uma possível iniciação inadvertida.

Warnings

1. O UAV deverá ser desenvolvido de modo que:
 - 1.1. Nos modos de operação do FCS em automático ou semiautomático, o UAV deverá encontrar-se automaticamente protegido de entrar em perda, à exceção do modo de aterragem automática, no qual a mesma poderá ocorrer antes da plataforma tocar a pista.

Capítulo 5. Seleção de Pilotos automáticos

5.1 Pilotos automáticos *closed source* e *open source*

Ao analisar o espectro de opções de pilotos automáticos disponíveis no mercado, é possível verificar que estes poderão ser agrupados em dois conjuntos. O primeiro é formado por sistemas de fonte fechada, que são comercializados como produto final. Estes PA são genericamente designados de *off-the-shelf autopilots*. O segundo grupo é formado pelos pilotos automáticos *open source*. Estes sistemas, de design modular, que permitem acesso aberto ao código fonte, possibilitam uma maior autoridade sobre o sistema incluindo maior liberdade para configurar e implementar soluções customizadas de *hardware* e *software*. Adicionalmente, este tipo de pilotos automáticos não se encontram associados a licenças de utilização específicas.

Neste trabalho de investigação serão comparados dois pilotos automáticos – o *Piccolo II* (sistema fechado) e o *Pixhawk* (sistema *open source*). Apesar de ser este o objetivo da presente dissertação, procurando enquadrar estas alternativas no estado da arte, as secções seguintes apresentam de forma sucinta as diferentes soluções de pilotos automáticos existentes no mercado, salientando as suas principais características.

5.1.1 Pilotos automáticos *Open Source*

Sendo os UAS recursos úteis também para entidades civis (Vicente, 2013), existem no presente variados projetos e plataformas em desenvolvimento por parte de comunidades científicas. Os parágrafos seguintes procuram uma identificação de alguns destes projetos.

Paparazzi autopilot

Desenvolvido pela Universidade *École Nationale de l'Aviation Civile* em França, este piloto automático possibilita navegação por *waypoints*, descolagem e aterragem automática e manutenção de altitude. Contudo, este PA possui lacunas no controlo básico da plataforma, não demonstrando um bom desempenho na manutenção de

referências de velocidade. Este fator resulta do facto deste piloto automático não possuir sensores de pressão dinâmica (HaiYang *et al.*, 2010). Na Figura 5-1 pode observar-se o *hardware* do *Paparazzi autopilot*.



Figura 5-1 - Hardware do piloto automático Paparazzi - Tiny 13 (Extraído de (HaiYang *et al.*, 2010), “Fig.8”).

Crossbow MNAV+Stargate autopilot

Desenvolvido pela empresa Crossbow, este piloto automático apresenta-se como uma solução mais completa relativamente ao *Paparazzi autopilot*. De maiores dimensões, este sistema incorpora mais sensores como acelerómetros e sensores de pressão, possuindo também variadas interfaces para ligação de elementos periféricos que o utilizador procure acrescentar (HaiYang *et al.*, 2010). O piloto automático é constituído por duas componentes de *hardware*, o MNAV e o *Stargate*. O elemento MNAV corresponde a um sistema inercial que integra recetor GPS, *drivers* para os servos e o interface *Pulse Position Modulation* (PPM). O componente *Stargate* consiste na placa que integra o processador PXA255 do piloto automático. Este *hardware* foi descontinuado e o seu preço no mercado contribuiu para uma disseminação reduzida (Chris, 2007).

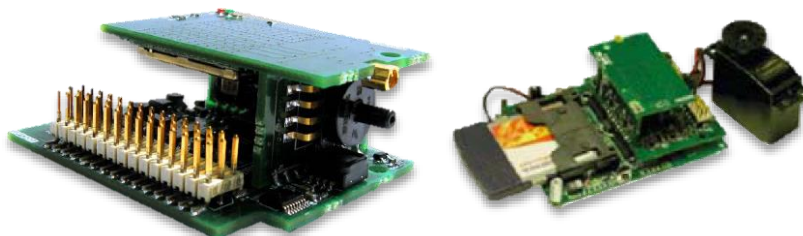


Figura 5-2 - Hardware MNAV (esquerda) e piloto automático Crossbow Mnav + Stargate Autopilot (direita) (Extraído de (HaiYang *et al.*, 2010)).

5.1.2 Autopilots Closed Source

Nesta secção do trabalho de investigação são identificados alguns sistemas de pilotos automáticos fechados. Estes são produzidos por diferentes entidades comerciais, possibilitando algumas delas uma ligeira customização de acordo com as necessidades do utilizador.

MicroPilot MP series

A empresa *MicroPilot*² disponibiliza uma variedade de pilotos automáticos para aeronaves de asa fixa e rotativa. Desde sistemas em pequenas placas de circuito impresso desenhados para pequenos UAS, até outros integrados de maiores dimensões, a *MicroPilot* disponibiliza soluções profissionais acompanhadas com software de comando e controlo comum a todos os seus sistemas - Horizon^{mp}.

O piloto automático MP2118^{LRC2}, apresentado pela *MicroPilot* como a melhor solução para aeronaves de asa fixa, possibilita entre outras capacidades, um alcance para controlo manual superior a 6 milhas náuticas, capacidade de navegação por *waypoints*, apresentando ainda 12 servos *output* e 8 *inputs* analógicos de sensores (MicroPilot, 2016).

Procerus Kestrel Autopilot V2.4

Desenvolvido para aeronaves de pequenas dimensões, este piloto automático pesa apenas 16,7 gramas sem o modem rádio e recetor GPS. Este sistema inclui sensores inerciais, magnetómetros e sensores de pressão estática e dinâmica sendo capaz de vários modos de voo automático e semiautomático. Integrando o processador *Rabbit 3000*, permite descolagem e aterragem automática, navegação por *waypoints* e outras capacidades como “*smart loitering*” (HaiYang *et al.*, 2010). Este recurso consiste na otimização automática da trajetória da aeronave de modo a

² <https://www.micropilot.com>

manter o alvo seleccionado no centro da imagem (*Field of view*) (Procerus Technologies, [s.d.]).

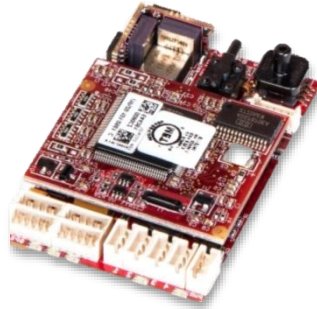


Figura 5-3 - Hardware Kestrel Autopilot V2.4 (Extraído de (Lockheed Martin Corporation, 2017)).

Airelectronics U-Pilot

Este piloto automático desenvolvido pela *Airelectronics UAV Autopilots*³ é uma solução possível de ser integrada em aeronaves de asa móvel ou fixa. Permitindo modos de voo manual e automático com navegação até 200 *waypoints* possíveis, o *hardware* deste PA disponibiliza ainda 31 *outputs* PWM e 4 portas série RS232 para ligação de elementos periféricos. Sendo o objetivo da entidade construtora apresentar uma solução profissional ao utilizador, apresenta ainda a possibilidade de customizar o piloto automático a necessidades específicas.



Figura 5-4 - Hardware do piloto automático U Pilot (Extraído de (Airelectronics UAV Autopilots, 2016)).

³ <http://www.airelectronics.es>

Piloto automático *Veronte*

O piloto automático *Veronte*, produzido pela *Embention*⁴, consiste na primeira solução de piloto automático que obedece aos requisitos dispostos pelas diferentes entidades reguladoras, como a EASA e FAA, cumprindo ao mesmo tempo com os regulamentos aeronáuticos DO254 e DO178/ED-12. Estes regulamentos, que abordam considerações sobre a certificação do *software* dos sistemas integrados na aeronave e do design do *hardware* eletrónico, garantem uma demonstração de cumprimento dos requisitos de aeronavegabilidade.

Este PA, apresentado como uma solução profissional, é capaz de total controlo de voo autónomo. Este sistema permite também a integração de diversos elementos periféricos como *transponder*, radar, rádio secundário, *gimbals*, entre outros (Embention, 2016).



Figura 5-5 - Hardware do Piloto Automático *Veronte* (Extraído de (Embention, 2016)).

5.2 Pilotos automáticos selecionados para avaliação

O *Pixhawk*, sendo um piloto automático *open source* com uma solução de *hardware* recente e com o seu *software* bastante desenvolvido, demonstra capacidades representativas do potencial dos sistemas *open source* (Ardupilot, 2017). Por outro lado, este piloto automático suporta-se também numa das maiores comunidades científicas desta área que o desenvolve ativamente (Adam, 2014). Estes factos contribuem para que a informação e dados sobre este piloto automático estejam

⁴ <https://www.embention.com/en/>

mais acessíveis contribuindo para uma avaliação comparativa com os sistemas fechados mais exata e fidedigna.

Até ao presente, as plataformas não tripuladas desenvolvidas na Academia da Força Aérea integram o piloto automático *Piccolo II* produzido pela *Cloud Cap Technology* (Perestrelo, 2015). Pelo facto de este sistema corresponder à tecnologia integrada atualmente nas plataformas do CIDIFA e sendo o mesmo um sistema fechado, é pertinente a sua escolha para sistema representativo deste conjunto de pilotos automáticos.

Em geral, as soluções comerciais apresentam capacidades semelhantes em termos de dimensões, consumos, capacidade do processador bem como modos de comando e controlo, relativamente aos pilotos automáticos *open source* (HaiYang *et al.*, 2010). De acordo com alguns estudos científicos como o de HaiYang *et al.* (2010) existem soluções de pilotos automáticos *open source* com o mesmo potencial de algumas alternativas fechadas. Contudo, as comparações realizadas limitam-se às características técnicas dos sistemas. Sendo este trabalho de investigação subordinado ao âmbito de aplicação militar, é necessário fazer uma avaliação que considere especificamente este contexto. Devido a este facto, no sentido de analisar qual o tipo de sistema mais apto para posterior integração nas plataformas do CIDIFA, é necessário identificar as limitações e lacunas deste tipo de sistemas quando se propõem a cumprir os requisitos operacionais e de aeronavegabilidade exigidos. Como tal, e sem perda de generalidade, a comparação entre estes dois sistemas, tendo em conta os requisitos definidos no âmbito deste trabalho de investigação, permitirá aferir qual dos tipos de solução corresponde da melhor forma a essas exigências impostas às plataformas autónomas de empenhamento militar.

Nos parágrafos seguintes serão apresentados os pilotos automáticos em estudo nesta dissertação.

5.2.1 Piccolo II

O *Piccolo II* é o piloto automático mais recente e de melhor desempenho produzido pela *Cloud Cap Technology*. Este constitui-se como um sistema que é comercializado como produto fechado para os seus utilizadores. Neste sentido, a sua arquitetura não é modular. O *Piccolo II* integra em si os sensores inerciais, sensores de dados de voo, recetor GPS e *data link*.



Figura 5-6 - Piloto automático *Piccolo II* (Extraído de (Cloud Cap Technologies, [s.d.])).

A *Cloud Cap Technology* apresenta este piloto automático com uma solução para aplicação profissional. Esta entidade é também responsável pelo desenvolvimento de outros elementos periféricos como sensores eletro-óticos e suportes para esses mesmos sensores. Como tal, o *Piccolo II* é compatível com uma grande quantidade de periféricos e sistemas de missão. Estes serão analisados numa fase posterior deste trabalho de investigação.

Este PA, robusto e de credibilidade reconhecida (totalizando, no conjunto dos UAS da FA, mais de 700 horas de voo desde 2009), não sendo ainda assim certificado, confere às plataformas a capacidade de rolagem, descolagem, voo e aterragem de forma automática, permitindo navegação entre diferentes *waypoints*, alteração do plano de voo, bem como interação com outros sistemas integrados na aeronave (Oliveira, 2009).

Ground Control Station e Piccolo Command Center

A *ground station* é o elemento responsável pelo estabelecimento e gestão da ligação de dados entre a estação de controlo e a aeronave. Esta também se encontra ligada à consola manual do *safety pilot* e assegura o fluxo de dados entre o piloto

automático e o interface de comando e controlo (que corre no computador de operação) designado por *Piccolo Command Center* (PCC) (ver Figura 5-7). É através do PCC que o operador do UAS controla e define as referências de navegação da aeronave. Para além de disponibilizar os dados de telemetria ao operador, este interface inclui também alertas visuais e sonoros referentes ao estado da plataforma aérea.

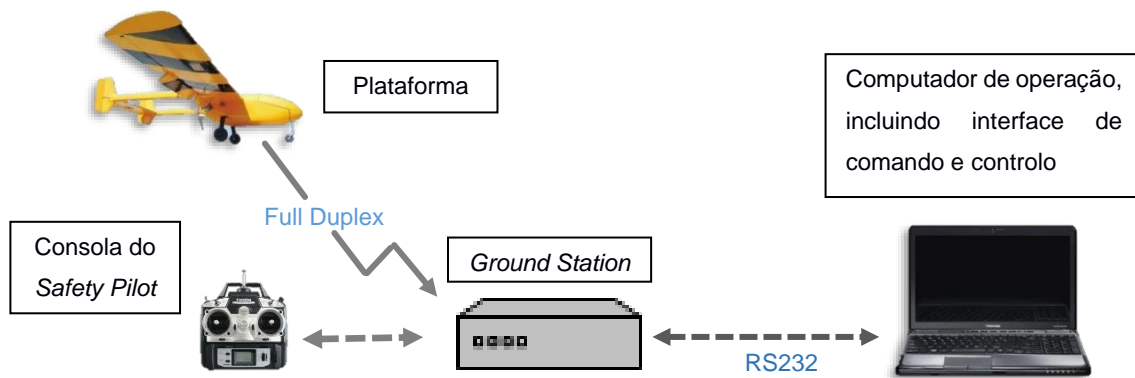


Figura 5-7 - Esquema genérico da rede de comunicações com um UAS.

5.2.2 Pixhawk

O *Pixhawk* resulta do projeto *open-hardware "PX4 Autopilot Project"* da *Computer Vision and Geometry Lab* da *ETH* Zurique. Este projeto surgiu com o objetivo de providenciar as comunidades científicas e industriais, bem como os utilizadores particulares, com *hardware* funcional e completo a um custo reduzido e de fácil acesso. Para a concretização deste objetivo entraram em colaboração múltiplas organizações comerciais e académicas em todo o mundo. Entre estas destacam-se a *3D Robotics*, *Ardupilot Group*, *Intel* e *Sony*. O aperfeiçoamento deste sistema e o seu desenvolvimento até ao estado atual consistiu num processo gradual. A contribuição dos vários atores nos variados campos contribuiu para alguma pluralidade de estados de desenvolvimento, designações e conceitos. Os parágrafos seguintes procuram clarificar os diferentes estágios percussores do piloto automático atual.

O sistema original denominava-se *PX4*. Esta designação referia-se ao *hardware* e ao *firmware*. O *hardware* consistia nas placas *PX4 FMU (Flight*

Management Unit) e PX4 IO (*Input/Output*), (ver Figura 5-8). O *firmware* era referido simplesmente com essa mesma designação ou também por “PX4 Firmware”.

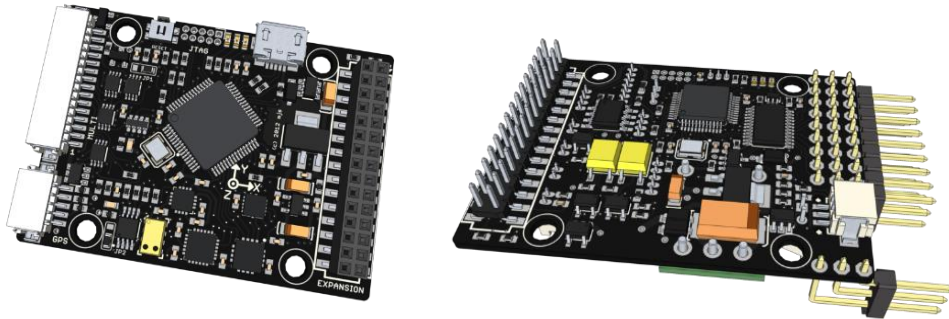


Figura 5-8 - Placa PX4FMU (esquerda) e placa PX4IO (direita) (Extraído de PX4 Autopilot).

Posteriormente surgiu o *hardware Pixhawk* (Figura 5-9), dando nome ao piloto automático em análise. Este consiste numa integração funcional das placas PX4FMU e PX4IO, às quais se adicionaram ainda novos sensores e capacidade de memória.



Figura 5-9 - Hardware Pixhawk (Extraído de PX4 Autopilot).

Apesar de o *Pixhawk* ter resultado do esforço coletivo entre as diferentes comunidades, o seu desenvolvimento e operação são continuados no presente principalmente por duas entidades: a *PX4 Autopilot* e a *ArduPilot*. Estas constituem-se como as comunidades de desenvolvimento de *software open source* para pilotos automáticos com maior expressão na comunidade científica.

Estas organizações são suportadas por equipas de engenheiros bem como por investigadores da comunidade científica que enviam os seus inputs e modificações para que possam ser aplicadas pelos restantes utilizadores. A sua participação

concretiza-se na existência de fóruns para a partilha de experiências e conhecimentos que contribuam para o desenvolvimento do *software*. O apoio é fornecido para particulares, através das plataformas de discussão e disseminação de informação generalizada – GitHub (GitHub, 2017), e também para instituições que pretendam comercializar ou desenvolver com maior profundidade as suas plataformas autónomas. Para essas, a *PX4 Autopilot* e a *Ardupilot* fornecem o contacto com entidades comerciais colaboradoras que desenvolvem áreas específicas dos UAS como a integração de *payload*, utilização de diferentes tipos de fuselagens ou consultadoria.

Devido ao desenvolvimento continuado por parte da *PX4* e *Ardupilot*, no presente existem duas soluções de software disponíveis. Tendo produzido o *hardware* e *middleware* conjuntamente, quanto ao *software* de controlo de voo, as duas comunidades tomaram caminhos evolutivos diferentes. Ambas apresentam código aberto, compatível com o *hardware* do piloto automático *Pixhawk*, porém, diferente entre si. O utilizador tem assim a opção de utilizar o *Flight stack PX4* ou *Ardupilot*. Ambos demonstram funcionalidades e desempenho semelhantes. A diferença encontra-se no tipo de apoio e informação disponibilizada por cada comunidade. Esta questão será explorada mais adiante nesta dissertação.

Ground Control Station

Um dos subsistemas do UAV é o elemento de comando e controlo (JAPCC, 2010). À semelhança do *Piccolo II*, para a operação do *Pixhawk* é utilizado uma aplicação de software que executa a interface entre o operador e o piloto automático permitindo o controlo da aeronave a partir do solo. A comunicação é estabelecida através da respetiva *ground station* (designada vulgarmente por radio modem, ver Figura 5-10) que é ligada diretamente ao computador, onde corre a aplicação de comando e controlo, através de uma porta USB.



Figura 5-10 - Modem rádio (Extraído de (PX4 Autopilot), "Radio Modems")

Ao contrário do *Piccolo II*, no qual o *software* de comando é o PCC obrigatoriamente, existem variadas aplicações possíveis para o controlo do piloto automático, seja este de *flight stack PX4* ou *ArduPilot*. Dentro da variedade das aplicações compatíveis com o *Pixhawk*, serão apenas consideradas as de código aberto. Sendo esta a valência característica deste piloto automático (que está na origem da sua escolha para este trabalho), não faria sentido limitar o mesmo com uma aplicação de controlo fechada ao utilizador. Deste modo, o código das interfaces de comando e controlo consideradas nesta dissertação encontra-se disponível para os utilizadores poderem alterar e desenvolver. As aplicações de *software* existentes, com maior expressão na comunidade científica, compatíveis com o *Pixhawk* e que se apresentam como uma possível solução são:

1. *Mission Planner* – Este *software*, amplamente utilizado, foi o primeiro a ser criado. É o mais desenvolvido possuindo o maior número de funcionalidades.
2. *QGroundControl* – Este *software* tem a particularidade de correr em todas as plataformas como computadores, tablets e telemóveis.
3. *APM Planner 2.0* – Segundo a *ArduPilot*, este *software* é o indicado para utilização em plataformas MAC ou Linux. Quando comparado com o *Mission Planner*, possui uma base de utilizadores mais reduzida e menos funcionalidades.

5.2.3 Configuração do Pixhawk considerada para avaliação

Perante as possibilidades de configuração deste sistema e sendo o objetivo deste trabalho de investigação uma avaliação comparativa entre pilotos automáticos, torna-se pertinente definir a configuração do *Pixhawk* que irá ser representativa deste PA *open source*. Deste modo, terão de ser definidos dois diferentes elementos deste piloto automático, sendo eles o *flight stack* (*software* de bordo) e o *software* de comando e controlo (*software* com interface para o operador, na estação de solo). As opções são apresentadas na Tabela 5-1:

Tabela 5-1 - Configurações possíveis de *flight stack* e *software* de controlo para o *Pixhawk*.

<i>Flight Stack</i>	<i>PX4</i>	<i>ArduPilot</i>	
<i>Software de comando e controlo</i>	<i>Mission Planner</i>	<i>QGroundControl</i>	<i>APM Planner 2.0</i>

Tendo em conta as referências bibliográficas consultadas no decurso deste trabalho de investigação, o *software ArduPilot* é aquele que se encontra desenvolvido de uma forma mais completa ((*ArduPilot*, 2017), (*DIY DRONES*, 2014)). Este estado de maior maturação deve-se ao facto de a *ArduPilot* possibilitar um maior suporte para os problemas identificados. Com uma comunidade mais ativa e um maior número de colaboradores a partilhar as suas informações e progressos, a customização e integração deste tipo de *software*, bem como o próprio desenvolvimento, tornam-se mais acessíveis. Por estes motivos, o *Pixhawk* utilizado para posterior avaliação comparativa possuirá *flight stack ArduPilot*. Este *software* é diferenciado para o tipo de plataforma para o qual é programado. Para aeronaves de asa fixa a *ArduPilot* disponibiliza o *Plane*. A versão utilizada, sendo a mais recente à data da elaboração da dissertação, é o *Plane 3.5.2*.

Relativamente ao *software* de comando e controlo, o critério utilizado para a escolha consistiu na avaliação do número de utilizadores e contribuidores de cada aplicação no GitHub (*GitHub*, 2017). Esta consiste numa plataforma online de partilha de conhecimentos e desenvolvimentos de código *open source*. Neste espaço, onde

existem vários projetos desde pessoais a comerciais, é exposto o código do *software* permitindo que a comunidade o adapte às suas necessidades específicas e possivelmente melhore e ajude as entidades primariamente responsáveis pelo seu desenvolvimento. Deste modo, o número de utilizadores e contribuidores auxilia na compreensão do nível de aceitação e utilização de cada aplicação de controlo na comunidade dos UAS.

Seguindo o critério previamente identificado, o *software* de comando e controlo que será considerado neste trabalho será o *Mission Planner*. A versão utilizada, sendo a mais recente à data da elaboração da dissertação, é o *Mission Planner 1.3.44*.

Relativamente ao *hardware* do piloto automático, devido à sua arquitetura modular, o *Pixhawk* depende de alguns elementos periféricos para cumprir as suas funções básicas enquanto piloto automático. Observe-se como exemplo o *air speed sensor* que neste caso não é integrado (ver Figura 5-11). Na comparação entre os pilotos automáticos, as capacidades e requisitos que sejam cumpridos por ambos, mas nos quais o *Pixhawk* dependa de um elemento periférico, serão assinalados.

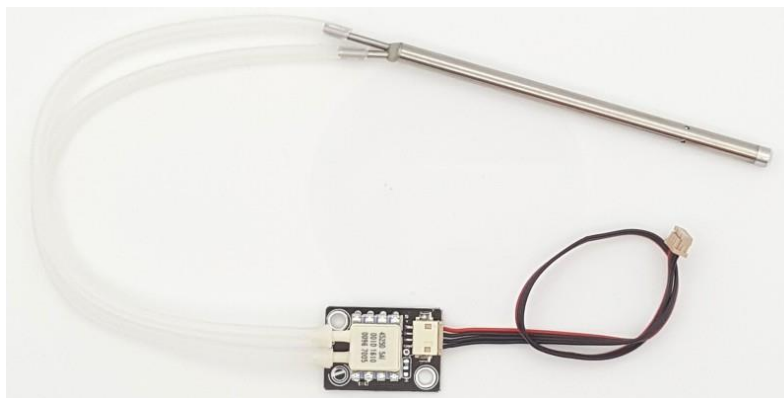


Figura 5-11 - PX4 Autopilot Air speed sensor (Extraído de (PX4 Autopilot), “PX4 Air Speed Sensor”).

Capítulo 6. Avaliação comparativa dos pilotos automáticos

De forma a possibilitar uma análise comparativa mais célere entre os diferentes pilotos automáticos, apresentam-se seguidamente as tabelas com os requisitos operacionais e de aeronavegabilidade. Estas combinam os diferentes critérios de avaliação, expondo quais os que são verificados pelos diferentes sistemas. Uma vez que o CIDIFA não tem registo de operação do *Pixhawk*, os requisitos referentes ao seu desempenho serão analisados tendo por base a documentação disponível e dados partilhados pela comunidade *Ardupilot*.

Seguidamente a cada tabela de requisitos, (organizada de acordo com as respetivas áreas funcionais), será apresentada uma discussão que procura uma observação mais explicativa dos resultados da comparação.

6.1 Requisitos de Aeronavegabilidade

Tabela 6-1 - *Requisitos de Aeronavegabilidade - Sistemas e Equipamentos* (Extraído de (NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2014)).

Sistemas e Equipamentos	Piccolo	Pixhawk
(1) Precisão máxima indicada pelo fabricante e compatível com os requisitos (dispositivos responsáveis pela trajetória)	✓	✓
(2) <i>Fault Detection</i> ou isolamento de uma falha grave e apresentação no <i>display</i> do operador	✓	✓
(3) Recetor GPS – teste de falha de sinal	-	-
(4) Teste do estado do sinal <i>data link</i>	-	✓
(5) Verificação da diferença de potencial	✓	✓
(6) Cumprimento de função nos cenários de operação definidos	✓	✓

Relativamente aos requisitos referentes aos sistemas e equipamentos integrados na aeronave, é possível verificar que ambos os pilotos automáticos cumprem os requisitos de forma semelhante. Os dois assinalam a falha ou a perda de capacidades importantes e potencialmente perigosas em voo, como por exemplo perda de sinal GPS, e asseguram a execução de funções nos cenários de operação previstos pelas perspectivas de emprego operacional. Contudo, apenas o *Pixhawk* efetua verificações autónomas dos seus sensores e sistemas previamente ao voo.

Apesar de não testar autonomamente a falha do sinal GPS, o *Pixhawk* realiza por si uma verificação dos sensores e da qualidade dos sinais recebidos – GPS e telemetria - antes de permitir que a aeronave possa descolar. A aplicação *Mission Planner* inclui assim um *pre-flight checklist*, com passos que são executados autonomamente e outros que necessitam de confirmação do operador. Este *checklist* pode ser ainda editado pelo utilizador (ver Figura 6-1).

Por seu lado, o CIDIFA procedeu à correção desta lacuna do *Piccolo II* através da elaboração de um *pre-flight checklist* que é seguido previamente à operação dos UAS. Este implica a observação dos parâmetros e sistemas cruciais garantindo uma operação segura e que a aeronave dispõe de todos os sistemas a operar corretamente previamente à descolagem.



Figura 6-1 - Display da aplicação *Mission Planner* – Excerto do *pre-flight checklist* com botão de edição (Extraído de (Ardupilot, 2016)).

Tabela 6-2 - Requisitos de Aeronavegabilidade – data link de comando e controlo (Extraído de (NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2014)).

Data link de comando e controlo	Piccolo	Pixhawk
(1) <i>Data link: Uplink</i>	✓	✓
(2) <i>Data link: Downlink</i>	✓	✓
(3) Eletronicamente compatível com outra estação de controlo e equipamento UAS	✓	✓
(4) Protegido contra interferência eletromagnética	-	-
(5) Protegido contra vulnerabilidade eletromagnética	-	-
(6) Sinais de aviso degradação de sinal	✓	✓
(7) Processo automático de reaquisição de sinal	✓	✓
(8) Emissão alerta em caso de perda de sinal (visual, audível ou ambos)	✓	✓
(9) Alerta contínuo até terminação pelo operador	✓	✓

Da análise dos requisitos para o *data link* de comando e controlo, resulta a conclusão de que ambos os pilotos automáticos correspondem de igual forma às necessidades levantadas pelo STANAG 4703. Ainda assim é pertinente realçar que ambos os sistemas não possuem proteção contra interferências eletromagnéticas.

Tabela 6-3 - Requisitos de Aeronavegabilidade – Ground Station (Extraído de (NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2014)).

Ground Station	Piccolo	Pixhawk
(1) Interface facilita o cumprimento da missão	✓	✓

Para a integração de uma aeronave em espaço aéreo não segregado, um vetor a ser observado consiste nas normas de operação e sustentação. Neste campo

insere-se a formação de operadores (Rossa, 2011). O treino dos operadores deverá ser ajustado ao tipo de UAS e missão desempenhada, garantindo os diferentes objetivos da sua formação como o conhecimento total do sistema e capacidade de operar de forma segura (Leandro, 2013). Será seguro afirmar que uma aplicação de interface clara e intuitiva facilitará a tarefa de comando e controlo por parte do operador e contribuirá para uma execução segura da missão.

Neste ponto, ambos os pilotos automáticos fornecem aplicações com semelhantes funcionalidades. Contudo, o *design* e nível de informação são diferentes.

O PCC encontra-se organizado de forma intuitiva sendo possível a seleção de janelas que agrupam dados respeitantes ao mesmo subsistema. Por outro lado, o *Mission Planner* apresenta um *layout* simples e mais incompleto. A informação de telemetria encontra-se disposta conjuntamente e o interface não é tão intuitivo. Enquanto que o PCC ostenta uma preparação para utilização profissional, o *Mission Planner* aparenta ser uma solução minimalista que responde às exigências primárias de utilização particular.



Figura 6-2 - Configuração típica do PCC (esquerda) e do Mission Planner (direita) (Extraído de (Barchet et al., 2012) e (ArduPilot, 2016)).

Tabela 6-4 - Requisitos de Aeronavegabilidade – Informação de voo apresentada na UCS (Extraído de (NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2014)).

Informação de voo apresentada na UCS	Piccolo	Pixhawk
(1) Indicated Airspeed	✓	✓
(2) Velocidade terreno	✓	✓

(3) Altitude de pressão e acerto altimétrico	✓	✓
(4) Rumo	✓	✓
(5) Posição do UAS num mapa com indicação de desvio entre percurso voado e rota	✓	✓
(6) Posição relativa ao transmissor/recetor em distância, radial e altitude	✓	-
(7) Apresentação dos parâmetros de voo comandados para o UAS	✓	✓
(8) Limites mínimos e máximos de velocidade	✓	✓
(9) Altitude	✓	✓
(10) Velocidade Vertical	✓	✓
(11) Estado do sistema de Navegação	✓	✓
(12) Dados do <i>G-meter</i>	✓	✓

Perspetivando os requisitos de aeronavegabilidade referentes à informação de voo apresentada na GCS, ambos os pilotos automáticos respondem aos parâmetros em semelhante extensão. Ainda assim, o *Mission Planner* não fornece a indicação da posição do UAS relativamente à *ground station* em distância e radial, mas apenas em coordenadas.

Tabela 6-5 - *Requisitos de Aeronavegabilidade - Decolagem Automática* (Extraído de (NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2014).

Decolagem	Piccolo	Pixhawk
(1) Não pode causar oscilações que ponham em causa a segurança	✓	✓
(2) Sistema de aborto à decolagem	✓	-

No que respeita aos requisitos de aeronavegabilidade referentes ao processo de descolagem automática do UAS, existe alguma discrepância entre os sistemas estudados. Em particular, o *Pixhawk* não possui na sua aplicação de comando e controlo uma função de aborto à descolagem.

Tabela 6-6 - Requisitos de Aeronavegabilidade - Precisão de Navegação (Extraído de (NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2014).

Precisão de Navegação	Piccolo	Pixhawk
(1) Apresentação de precisão	✓	✓
(2) Aviso de desvio da rota planeada	✓	✓
(3) Iniciação de procedimento de recuperação se ocorrer um desvio excessivo	✓	✓

No campo da precisão de navegação, os dois pilotos automáticos correspondem na mesma extensão aos requisitos retirados do STANAG 4703.

Tabela 6-7 - Requisitos de Aeronavegabilidade - Aterragem Automática (Extraído de (NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2014)).

Aterragem automática	Piccolo	Pixhawk
(1) Não pode causar oscilações que ponham em causa a segurança	✓	✓
(2) Função de aborto à aterragem	✓	✓

No âmbito de aterragem automática, ambos os sistemas correspondem aos requisitos definidos.

Tabela 6-8 - Requisitos de Aeronavegabilidade – Trim (Extraído de (NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2014)).

Trim	Piccolo	Pixhawk
(1) Utilização de <i>Trim</i> pelo FCS	✓	✓

O trim corresponde a uma superfície aerodinâmica que se encontra nas superfícies de controlo das aeronaves induzindo nestas uma deflexão que permite a estabilização da plataforma. No caso dos UAS de reduzida dimensão e de *design* mais simples, a atuação do *trim* corresponde a variações de pequena amplitude nas superfícies de controlo alterando a sua posição neutral. Ambos os sistemas de piloto automático utilizam e permitem a configuração deste recurso.

Tabela 6-9 - Requisitos de Aeronavegabilidade – Controlabilidade e manobrabilidade (Extraído de (NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2014)).

Controlabilidade e manobrabilidade	Piccolo	Pixhawk
(1) Modo automático de operação	✓	✓
(2) Modo semiautomático de operação	✓	✓
(3) Modo manual de operação	✓	✓
(4) Indicação clara na UCS do modo de operação	✓	✓
(5) Controlabilidade e manobrabilidade em segurança em todos os modos, fases de voo e condições atmosféricas	✓	✓

Quanto aos requisitos referentes à controlabilidade e manobrabilidade, a análise dos pilotos automáticos permitiu concluir que os ambos correspondem de igual forma.

Tabela 6-10 - Requisitos de Aeronavegabilidade – Recuperação de emergência (Extraído de (NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2014)).

Recuperação de emergência	Piccolo	Pixhawk
(1) Sistema de recuperação de emergência	✓	✓
(2) Sistema ou função que termine o plano de voo e missão ou procedimento de recuperação iniciado pelo operador ou sucessão específica de eventos	✓	✓
(3) Recuperação de emergência em qualquer situação dentro do envelope de voo	✓	✓
(4) Salvaguarda de iniciação inadvertida	✓	✓

Os requisitos de aeronavegabilidade referentes à recuperação de emergência da plataforma são correspondidos de igual forma por ambos os pilotos automáticos.

Tabela 6-11 - Requisitos de Aeronavegabilidade – Warnings (Extraído de (NATO STANDARDIZATION AGENCY (NSA), 2014)).

Warnings	Piccolo	Pixhawk
(1) Proteção contra a perda em modos automático e semiautomático (excetuando aterragem automática)	✓	✓

Ambos os pilotos automáticos adotam medidas de prevenção de perda de sustentação nos modos de operação automático e semiautomático.

6.2 Requisitos Operacionais

Nesta secção procede-se à análise comparativa dos pilotos automáticos tendo em conta os requisitos operacionais identificados no Capítulo 3.

Os requisitos cujo cumprimento seja parcial serão assinalados com o símbolo (V). Estes casos em particular serão analisados e especificamente discutidos.

Tabela 6-12 - Requisitos Operacionais (Extraído de (Alfaro, 2015), (Chiote, 2012), (MFA 500-12, 2013), (Oliveira, 2014), (Vicente, 2013)) .

Requisitos		Piccolo	Pixhawk
1) Alcance rádio	90 n.m.	-	-
2) Bloco de Operação	5.000'- 15.000'	✓	✓
3) Autonomia VIMAR	≥9 Hrs	✓	✓
4) Velocidade Cruzeiro	>60 Kts	✓	✓
5) Velocidade busca/loiter	>45 Kts	✓	✓
6) Integração de <i>Payload</i>		✓	✓
7) Lançamento e aterragem em plataformas móveis		✓	✓
8) Aterrar com componente vento frontal	≤ 25 Kts		
9) Aterrar com componente vento cruzado	≤ 15 Kts		
10) Operação com precipitação transitória		✓	✓
11) Operação com turbulência transitória			
12) Condições de formação de gelo ligeiras			
13) Sistema Navegação Integrado	INS/GNSS	✓	✓
14) Aproximações por rádio ajudas		-	V
15) Troca de dados com outros sistemas de informação de forma segura		-	-

Observando os requisitos operacionais para os UAS, é possível afirmar que parte deles se refere ao *design* e desempenho da plataforma. Por este mesmo motivo, os requisitos 8), 9), 11) e 12) não se encontram verificados. A capacidade de a aeronave lidar com turbulência, formação de gelo e ventos de determinada intensidade depende sobretudo da estrutura física da mesma.

Por outro lado, não sendo fatores limitativos para o objeto de estudo, quer o *Piccolo II* quer o *Pixhawk* correspondem de igual modo aos parâmetros como velocidade, autonomia, bloco de operação e operação com precipitação transitória.

Os restantes critérios encontram-se ligados ao desempenho do piloto automático do UAS e é possível agrupá-los em quatro campos, sendo estes:

1. Alcance;
2. Navegação;
3. *Payload* integrado;
4. *Data link*.

Os requisitos da Tabela 6-12 que correspondem aos campos acima referidos serão discutidos em detalhe nas secções seguintes.

6.2.1 Alcance

Nenhum dos pilotos automáticos possui em si a capacidade de operar com um alcance de 90 n.m. Contudo, e para ambos os sistemas, esta solução poderá ser contornada utilizando comunicações satélite ou emissores e recetores de maior diretividade e/ou potência de transmissão, de modo a aumentar o seu alcance em linha de vista rádio.

6.2.2 Navegação

Ambos os pilotos automáticos utilizam o sinal GPS como entrada primária para obter uma solução de navegação. Para garantir a segurança de operação, dissipando o risco devido aos erros de sinal e baixa frequência (4Hz), comparam o sinal recebido com as estimativas geradas pelo sistema de navegação inercial – *Extended Kalman*

Filter (Pixhawk) e Nav filter (Piccolo II) (HaiYang et al., 2010). Ainda assim, enquanto que o recetor GPS do *Piccolo II* se encontra integrado, no *Pixhawk* existe a necessidade de ser ligado um módulo GPS externo.



Figura 6-3 – Pixhawk com módulo GPS + Compass da 3D Robotics (Extraído de (Ardupilot, 2016).

Relativamente ao requisito operacional referente à navegação por rádio ajudas, existem contribuidores da comunidade *Ardupilot* a desenvolver projetos neste sentido. No entanto, estes encontram-se em fase experimental e procuram apenas a utilização de *Automatic Direction Finders* (ADF) para potencial ação de *Homing*.

6.2.3 Payload integrado

A integração de elementos periféricos constitui-se como o fator onde os pilotos automáticos demonstram mais visivelmente as suas diferenças. É também sob este conceito que reside o seu principal contributo, uma vez que o *payload* integrado dita grande parte do valor operacional do UAS.

A facilidade de integração de *hardware* (sensores EO, *transponder*, sensor de combustível, etc.) nas plataformas aéreas depende em grande medida do suporte proporcionado pelo próprio piloto automático no que respeita aos respetivos *drivers*. De qualquer das formas, a resolução de potenciais desafios gerados na inclusão de periféricos não suportados de raiz será algo que estará sempre dentro das capacidades do CIDIFA. Na prática, a facilidade com que estes sistemas são integrados influencia a carga de trabalho no Centro de Investigação bem como a complexidade dos PA. A existência de periféricos reconhecidos pelo piloto automático,

com interfaces programadas e que permitam a utilização imediata após a ligação – “Plug and Play” - é assim um fator a ter em consideração (ver Figura 6-4).

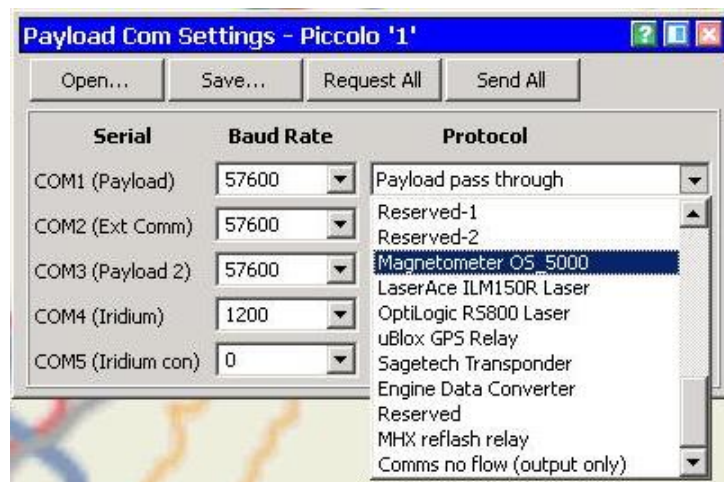


Figura 6-4 - Janela Payload Comm Settings retirada do PCC.

Deste modo, seguidamente será analisado se os pilotos automáticos possuem uma interface programada para os periféricos impostos como requisito operacional (designador Laser, retransmissor rádio multifrequência, radar SAR, gimbal para sensor EO e *transponder*), bem como identificados os sistemas periféricos que expandem as capacidades dos mesmos, e cuja integração já se encontra preparada. Os resultados serão apresentados sob a forma de tabela (ver Tabela 6-13).

Devido à sua relevância na configuração da plataforma, serão também referenciadas as funções pré-programadas para a utilização das linhas *general purpose input/output* (GPIO), como por exemplo, a indicação de quantidade de combustível. Devido à extensão de funções e ao facto de muitas terem pouca relevância para a avaliação do sistema devido à sua simplicidade, como a programação de servos para controlo das superfícies de voo, os sistemas e funções comuns aos dois pilotos automáticos foram excluídos da tabela. Importa ainda mencionar que esta agrupa os sistemas periféricos e funções de acordo com a organização definida pelo CIDIFA na arquitetura de sistemas dos UAS. A figura seguinte representa essa mesma organização:

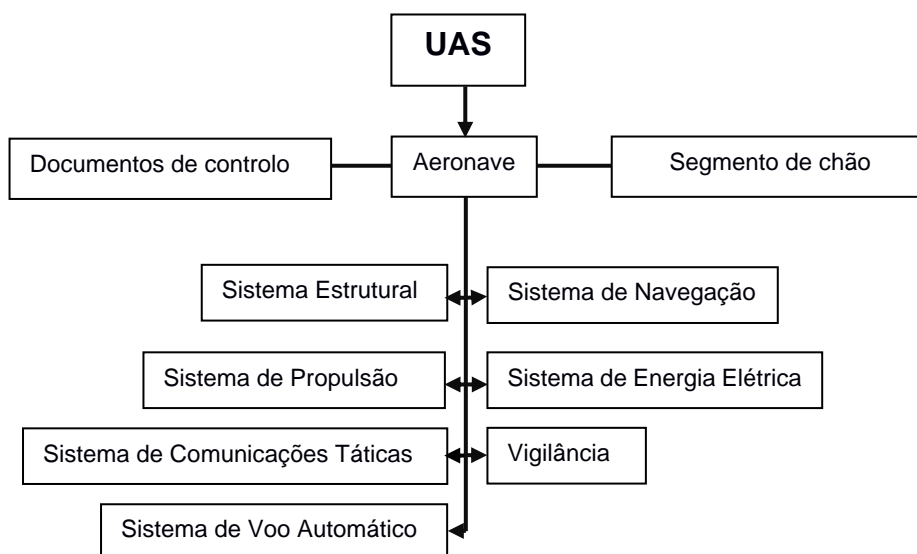


Figura 6-5 - Arquitetura dos Sistemas do UAS do CIDIFA.

Seguidamente, apresenta-se a tabela de comparação dos sistemas periféricos compatíveis com o *Piccolo II* e *Pixhawk*.

Tabela 6-13 - Comparação de Sistemas Periféricos compatíveis com o *Piccolo* e *Pixhawk*.

Área de sistemas	Sistemas Periféricos	<i>Piccolo</i>	<i>Pixhawk</i>
Sistema estrutural	Onboard Display (Ver anexo B)	-	✓
	Linha GPIO <i>ground contact switch</i>	✓	-
Sistema de Navegação	Transponder	✓	-
	ADS-B Receiver	-	✓
	Launch Inhibit Servo	✓	-
Sistema de Propulsão	Linha GPIO Fuel Flow	✓	-
	Linha GPIO Fuel Level	✓	-

Sistema de Energia Elétrica	Magnetómetro	✓	-
	Linha GPIO Lights	✓	-
Sistema de comunicações táticas	Satellite Comm Modem	✓	-
	Secondary Comm radio	✓	-
	Linha GPIO Iridium Control	✓	-
	Linha GPIO Iridium Power Control	✓	-
	Retransmissor rádio multifrequência	-	-
Vigilância	Gimbal	✓	Com controlador
	Linha GPIO Gimbal Deploy	✓	-
	Designador Laser	-	-
	Câmara Sony	✓	-
	Radar de Abertura Sintética (SAR)	-	-
Sistema de Voo Automático	Air Speed Sensor	Integrado	✓
Sistema de Voo Automático	Linha GPIO Water Speed Input	✓	-

Como é observável, ao contrário do *Piccolo II*, as soluções apresentadas para integração no *Pixhawk* obrigam à ligação de *hardware* adicional (onde se inclui o respetivo driver), como interface entre o piloto automático e o respetivo periférico. Este facto obriga a um esforço adicional de integração elétrica e mecânica na aeronave. Observe-se por exemplo a integração de uma *gimbal* para a qual é necessária a ligação de um controlador (ver Figura 6-6).

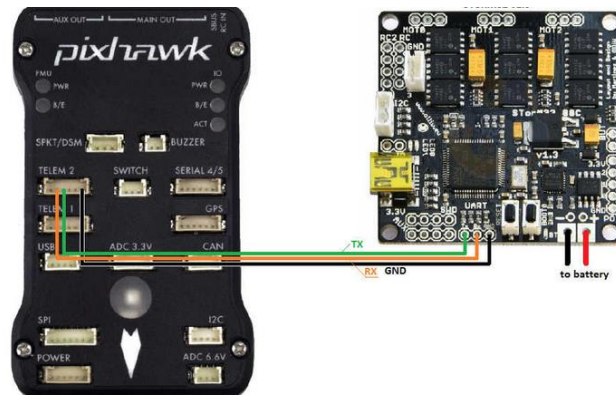


Figura 6-6 - STORM32 Gimbal Controller (Extraído de (Ardupilot, 2016)).

6.2.4 Data link

Os requisitos operacionais referidos pelos diferentes ramos das forças armadas refletem a ambição de possuir uma capacidade UAS integrada num sistema ISTAR. Para tal é estipulada a necessidade de veiculação de dados e informação de forma segura e para as entidades pretendidas. Atualmente, nenhum dos pilotos automáticos possui desenvolvida a proteção do *data link* sendo esta uma fragilidade de ambos os sistemas.

Capítulo 7. Discussão dos resultados obtidos

De modo a interpretar os resultados obtidos, é necessário considerar os dois âmbitos que compõem a avaliação comparativa destes pilotos automáticos separadamente – a aeronavegabilidade e desempenho operacional.

Quanto aos requisitos de aeronavegabilidade será possível afirmar que ambos os pilotos automáticos demonstram uma resposta muito semelhante entre si. Com exceção de alguns critérios, e apesar de o *Piccolo II* se apresentar como o sistema que corresponde a mais requisitos, a diferença entre os dois neste aspeto é residual. Este resultado poderá ter sido obtido devido a duas razões. A primeira refere-se ao atual estado de desenvolvimento da tecnologia associada aos pilotos automáticos. Sendo os UAS uma realidade crescente e a sua integração em espaço aéreo não segregado um desafio cada vez mais referenciado, o desenvolvimento deste tipo de sistemas é feito no sentido de colmatar as mesmas exigências para segurança de voo e de operação. Por outro lado, esta semelhança poderá também indicar que os requisitos considerados são bastante abrangentes, procurando apenas competências base nos pilotos automáticos. Observe-se o exemplo dos programas de software utilizados na estação de solo para comando e controlo da plataforma. O PCC é uma aplicação mais completa, melhor organizada e mais funcional comparativamente ao *Mission Planner*. Ainda assim, segundo a matriz retirada do STANAG 4703, estas aplicações equiparam-se em termos de certificação de aeronavegabilidade segundo os critérios NATO.

Relativamente aos requisitos operacionais, a semelhança entre os pilotos automáticos reduz-se. A integração de *payload* representa a área onde esta a diferença se torna mais evidente.

O *Piccolo II*, enquanto produto fechado e finalizado, possui um maior número de elementos periféricos compatíveis. Este possui interfaces pré-programadas não só para o controlo dos periféricos, como também para configuração das linhas GPIO. Estas configurações já preparadas procuram atenuar o facto de este piloto automático não poder ser alterado e customizado pelo utilizador.

Relativamente à integração de *payload* resultante dos requisitos operacionais, apesar de nenhum possuir interfaces já desenvolvidas para a integração de

designador laser, retransmissor rádio e radar SAR, o *Piccolo II* demonstra-se como o piloto automático mais apto. Este permite a instalação facilitada de *transponder* e *gimbal* para sensores EO e sendo estes os sistemas periféricos integrados nas plataformas atuais da FA este piloto automático encontra-se assim em vantagem em relação ao *Pixhawk*.

Em relação ao software de comando e controlo o *Mission Planner* mostra um desempenho mais modesto em relação ao PCC. O programa *open source* caracteriza-se por alguma simplicidade e de modo a que se equipare ao PCC o utilizador terá que desenvolver algum trabalho de adaptação e transformação.

Ainda assim, este mesmo facto não implica que se descarte permanentemente o *Pixhawk* enquanto alternativa. Apesar de se apresentar como um piloto automático menos desenvolvido e aperfeiçoado, e de não possuir interfaces pré-programadas para os mesmos sistemas periféricos, este piloto automático mantém a sua principal característica – o código aberto. Esta é uma característica que confere ao CIDIFA um conjunto alargado de opções. Por exemplo, caso seja necessária a integração de um determinado periférico devido ao seu desempenho, este piloto automático não é limitativo sendo a sua instalação possível através da manipulação da arquitetura do piloto automático.

A opção entre ambos os pilotos automáticos reside numa análise de custo benefício. Em oposição encontram-se dois pilotos automáticos com capacidades semelhantes, porém em estados de evolução diferentes.

Por um lado, o *Pixhawk* inclui poucas funcionalidades, apresentando respostas primárias a desafios de baixa complexidade gerados por uma comunidade de utilizadores. Deste modo, para que seja possível o desenvolvimento de valências mais complexas e profissionais será necessário um empenhamento do CIDIFA em desenvolver as capacidades deste piloto automático.

Por outro, o *Piccolo II* faculta uma solução testada e profissional, permitindo que o CIDIFA direcione o seu esforço de investigação para objetivos mais imediatos, com garantia de maior robustez e fiabilidade.

Capítulo 8. Conclusões e trabalhos futuros

Devido ao desenvolvimento da tecnologia atual, bem como à sua disseminação pelo público generalizado, os utilizadores possuem no presente múltiplas alternativas de pilotos automáticos a considerar. O surgimento no mercado de sistemas criados por comunidades de utilizadores, que não estão sujeitos a licenças de utilização específicas e permitem acesso aberto ao código fonte, resultou numa ampliação ainda maior do espectro de opções.

Com esta dissertação pretendeu-se analisar qual o sistema de piloto automático, pertencente a um conjunto pré-definido, que será mais apto para integração nos UAS produzidos pelo CIDIFA. Para cumprir tal objetivo, foram identificados os requisitos operacionais e de aeronavegabilidade pertinentes para aferir as capacidades dos sistemas e o resultado da análise comparativa foi apresentado sob a forma de tabelas, de modo a facilitar a interpretação desses dados.

A análise das tabelas obtidas demonstra que ambos os pilotos automáticos correspondem aos requisitos identificados de forma semelhante. Contudo, as diferenças encontradas poderão ter influência na tomada da decisão de qual o sistema a escolher, na medida em que esta se baseará na gestão de tempo, esforço e recursos do CIDIFA.

Em relação aos requisitos de aeronavegabilidade é possível afirmar que ambos os pilotos automáticos correspondem na mesma extensão. Ainda assim, as soluções apresentadas pelo *Pixhawk* apresentam-se como mais simples e apenas suficientes para cumprir as exigências abrangentes dos requisitos identificados.

Relativamente aos requisitos operacionais ambos os pilotos automáticos demonstram capacidade para cumprir os requisitos definidos. Contudo, o *Piccolo II*, possuindo maior adaptabilidade com um maior número sistemas periféricos, incluindo os atualmente utilizados pelo CIDIFA, exige menor esforço na sua integração garantindo resultados fiáveis.

Em suma, e no sentido de responder à pergunta de partida que orientou este trabalho de investigação, apurou-se que o *Piccolo II* é o piloto automático mais apto para integração imediata nas plataformas do CIDIFA e que o *Pixhawk* se constitui

como uma opção de longo prazo a ter em consideração, dada a liberdade e controlo customizado que este permite.

8.1 Sugestões para trabalhos futuros

No seguimento do trabalho desenvolvido nesta dissertação, sugere-se a identificação dos elementos periféricos que corresponderão às exigências operacionais identificadas. Desta forma, será possível aferir qual a extensão de esforço adicional que seria imposto ao CIDIFA para a sua integração em pilotos automáticos sem interfaces já programadas, permitindo efetuar uma ponderação exata do custo benefício na sua utilização.

Uma das principais limitações encontradas neste trabalho de investigação foi o facto de todas as plataformas de asa fixa operadas pelo CIDIFA integrarem apenas o piloto automático *Piccolo II*. Tendo em conta os resultados e as conclusões deste trabalho de investigação, caso seja tomada a opção de explorar de forma efetiva a utilização do *Pixhawk*, sugere-se a sua instalação preliminar numa plataforma de asa fixa, que possa servir como base adicional de estudo, permitindo obter validação prática deste trabalho e aferir com maior rigor as suas potencialidades.

Capítulo 9. Bibliografia

ADAM, Fabio - **Droning On: Choosing a flight controller** [Em linha], atual. 2014. [Consult. 15 dez. 2016]. Disponível em WWW:<URL:<http://hackaday.com/2014/06/06/droning-on-flight-controller-round-up/>>.

AeroVironment – **UAS: RQ-11B Raven** [Em linha], atual. 2017. [Consult. 21 jan. 2017]. Disponível em WWW:< <https://www.avinc.com/uas/view/raven>>.

AIRELECTRONICS UAV AUTOPILOTS - **Airelectronics UAV Autopilots – U Pilot** [Em linha], atual. 2016. Disponível em WWW:<URL:http://www.airelectronics.es/products/air_segment/air_hw/>.

ALFARO, Rui - **Os Veículos Aéreos Não Tripulados na PSP: Visão Estruturante e Aplicabilidade Operacional**. Lisboa: Instituto Superior de Ciências Policiais e Segurança Interna, 2015. Dissertação de Mestrado.

ARDUPILOT - **DR UBlox GPS + Compass Module** [Em linha], atual. 2016. [Consult. 14 nov. 2016]. Disponível em WWW:<URL:<http://ardupilot.org/copter/docs/common-installing-3dr-ublox-gps-compass-module.html>>.

ARDUPILOT - **Glossary** [Em linha], atual. 2016. [Consult. 21 nov. 2016]. Disponível em WWW:<URL:<http://ardupilot.org/copter/docs/common-glossary.html>>.

ARDUPILOT - **Mission Planner Overview** [Em linha], atual. 2016. [Consult. 14 nov. 2016]. Disponível em WWW:<URL:<http://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html>>.

ARDUPILOT - **OnBoard Display** [Em linha], atual. 2016. [Consult. 16 nov. 2016]. Disponível em WWW:<URL:<http://ardupilot.org/copter/docs/common-display-onboard.html>>.

ARDUPILOT - **PX4 vs Ardupilot - When to choose what** [Em linha], atual. 2017. [Consult. 8 jan. 2017]. Disponível em WWW:<URL:<http://discuss.ardupilot.org/t/px4-vs-ardupilot-when-to-choose-what/14262>>.

ARDUPILOT - **SToRM Gimbal Controller** [Em linha], atual. 2016. [Consult. 16 nov. 2016]. Disponível em WWW:<URL:<http://ardupilot.org/copter/docs/common-storm32->

gimbal.html>.

AUSTIN, Reg - **Unmanned Aircraft Systems UAV Design, Development and Deployment**. 1ª ed. Chichester: Wiley, 2010. ISBN: 978-0-470-05819-0

Autoridade Aeronáutica Nacional. Circular nº 01/13, 23-09-2013, Acessível na Autoridade Aeronáutica Nacional, Lisboa, Portugal.

BARCHET, Alex *et al.* - **PCC User's Guide**. [S.l.] : UTC AerospaceSystems, 2012.

CEDN, 2013 – **Conceito Estratégico de Defesa Nacional**. Vertido no nº 1.4.4 da Resolução do Conselho de Ministros nº19 de 2013, publicada em Diário da República, 1ª série, nº67 de 5 de abril de 2013 (2013), p. 1981-1995;

CHIOTE, Diogo - **Requisitos Operacionais para os Veículos Aéreos Não Tripulados (UAV) na Guarda Nacional Republicana**. 2012. Acessível na Academia Militar, Lisboa, Portugal.

CHRIS, Anderson - **DIY Drones - The leading community for personal UAVs** [Em linha], atual. 2007. [Consult. 10 jan. 2017]. Disponível em WWW:<URL:http://diydrones.com/profiles/blogs/705844:BlogPost:16708>.

Cloud Cap Technology – **Piccolo Autopilots** [Em linha], atual. 2017. [Consult. 10 out. 2016]. Disponível em WWW:<URL:http://www.cloudcaptech.com/products/auto-pilots >.

COSTA, António - Centro de Investigação da Academia da Força Aérea. **Revista Científica Academia da Força Aérea**. Lisboa. Vol.1, (2011), p. 14-25.

DIY DRONES - **Which Software To Use with PX4, Qgroundcontrol or APM:Copter?** [Em linha], atual. 2014. [Consult. 16 nov. 16]. Disponível em WWW:<URL:http://diydrones.com/forum/topics/which-software-to-use-with-px4-qgroundcontrol-or-apm-copter>.

EDA. Military Airworthiness Authorities Forum. EUROPEAN MILITARY AIRWORTHINESS DOCUMENT - EMAD 1 - DEFINITIONS AND ACRONYMS DOCUMENT. (23-05-2013)

Embention – **Veronte Autopilots** [Em linha], atual. 2017. [Consult. 20 mar. 2017].

Disponível em WWW:<URL: <https://products.embention.com/veronte/uav-autopilot>>.

FAP-DCSI - **SEAGULL** [Em linha], atual. 2017. [Consult. 17 jan. 2017]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.emfa.pt/www/po/unidades/subPagina-10D00-019.005.003.011-seagull>>.

FAP-DCSI. **Esquadra 751 - Pumas** - [Em linha], atual. 2016. [Consult. 4 dez. 2016]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.emfa.pt/www/po/esquadra/esq751>>.

FARTO, João - **Emissão de Certificados - Tipo para Aeronaves Legacy**. Sintra: Academia da Força Aérea, 2016. Dissertação de Mestrado.

GITHUB - **PX4/Firmware** [Em linha], atual. 2017. [Consult. 17 jan. 2017]. Disponível em WWW:<URL:<https://github.com/search?q=topic%3Apixhawk+org%3APX4&type=Repositories>>.

GONÇALVES, Paula - **Fiabilidade de Sistemas e Componentes de UAV's**. Porto: Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2016. Tese de Doutoramento.

HAIYANG *et al.* - Autopilots for small unmanned aerial vehicles: A survey. **International Journal of Control, Automation and Systems**. . ISSN 15986446. Vol. 8, nº1 (2010), p. 36–44.

INFORMATION TECHNOLOGY BLOG - **What's the Difference Between Open Source and Closed Source Software?**. [Em linha], atual. 2015. [Consult. 17 jan. 2017]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.itgct.com/whats-the-difference-between-open-source-and-closed-source-software/>>.

Inteli - **Base Tecnológica e Industrial de Defesa (BTID)** [Em linha], atual. 2016. [Consult. 20 nov. 2016]. Disponível em WWW:<URL: <http://www.inteli.pt/pt/go/btid>>.

JAPCC – **Strategic Concept of Employment for Unmanned Aircraft Systems in NATO**, Joint Air Power Competence Centre, (2010);

LEANDRO, Pedro - **CERTIFICAÇÃO DE OPERADORES DE “UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS” MILITARES**. Lisboa: Instituto de Estudos Superiores Militares, 2013.

Lei de Defesa Nacional. Lei nº31-A/2009 de 7 de julho.

LOCKHEED MARTIN CORPORATION - **Kestrel Flight Systems & Autopilot** [Em linha], atual. 2017. [Consult. 20 jan. 2017]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.lockheedmartin.com/us/products/procerus/kestrel-autopilot.html>>.

MARQUES, Pedro - Validação de um sistema DGPS para Navegação de UAV do Projeto PITVANT. **Revista Científica Academia da Força Aérea**. Lisboa. Vol. 4, (2014).

MFA 500-11 – **Conceito de Operações para o Reconhecimento e Vigilância**, Estado-Maior da Força Aérea (EMFA), Divisão de Operações, (2012);

MFA 500-12 – **Visão Estratégica para Sistemas de Aeronaves Não Tripuladas**. Estado-Maior da Força Aérea (EMFA), Divisão de Operações, (2013);

MICROPILOT - **MicroPilot - World Leader in Professional UAS Autopilot** [Em linha], atual. 2016. [Consult. 4 fev. 2017]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.micropilot.com/pdf/brochures/brochure-MP2128LRC-HELI.pdf>>.

MORGADO, José - **Sistemas Aéreos Autónomos Não-tripulados nas vertentes militar, de segurança e civil: definição de uma estratégia nacional**. Lisboa: Instituto Universitário Militar Departamento de Estudos Pós-Graduados, 2016.

NATO, 2014. STANAG 4703 – Light Unmanned Aircraft Systems Airworthiness Requirements.

OLIVEIRA, José - **O programa de sistemas aéreos não tripulados da força aérea portuguesa como alicerce da capacidade aérea não tripulada nacional**. Lisboa: Instituto de Estudos Superiores Militares, 2014. Dissertação de Mestrado.

OLIVEIRA, Tiago - **Desenvolvimento de Metodologias para o Projecto Integrado de Sistemas de Condução e Controlo de Veículos Aéreos não Tripulados**. Sintra: Academia da Força Aérea, 2009. Dissertação de Mestrado.

PAIS, Joel - **A Estratégia de Implementação e Exploração de Unmanned Aircraft Systems na Força Aérea Portuguesa**. Lisboa: Instituto de Estudos Superiores

Militares, 2013.

PEREIRA, Alexandre - **Operacionalização , no contexto da Força Aérea , de um Sistema Aéreo Autónomo Não-Tripulado Classe II para Vigilância Marítima e Busca e Salvamento**. Sintra: Academia da Força Aérea, 2016. Tese de Mestrado.

PROCERUS TECHNOLOGIES - **Procerus Technologies - Kestrel Autopilot V2.4** [Em linha] , atual. 2017. [Consult. 20 jan. 2017]. Disponível em WWW:<URL:http://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed/data/ms2/documents/procerus/Kestrel_v2.4_04_18_2008.pdf>.

ROSSA, José - **O Emprego de Unmanned Aerial Systems em Operações Militares e Outras Missões de Interesse Público - Desafios para as Forças Armadas**. Lisboa: Instituto de Estudos Superiores Militares, 2011.

UNMANNED AERIAL VEHICLE SYSTEMS ASSOCIATION - **UAV or UAS** [Em linha], atual. 2017. [Consult. 13 jan. 2017]. Disponível em WWW:<URL:https://www.uavs.org/index.php?page=what_is>.

VICENTE, João - **Guerra Aérea Remota - A revolução do Poder Aéreo e as oportunidades para Portugal**. 1ª ed. Porto: Fronteira do Caos Editores, 2013. ISBN 978-989-8647-08-5.

VICENTE, João - **Unmanned Aircraft Systems: contributos para uma visão estratégica**. 2011.

VICENTE, João *et al.* - **A Transformação do Poder Aeroespacial**. 1ª ed. Porto: Fronteira do Caos Editores, 2013. ISBN 978-989-8647-13-9.

Anexos

Anexo A – Classes UAS -----A-1

Anexo A - Classes UAS

De modo a uniformizar a classificação dos UAS, a NATO dividiu os mesmos em diferentes classes. Estas divisões foram elaboradas considerando como fator preponderante o peso máximo à descolagem. Dentro das classes existem ainda categorias, dependendo do peso e altitude máxima de operação. Seguidamente apresentam-se sucintamente as classes identificadas:

Classe I: MTOW inferior a 150 Kg. Esta classe encontra-se subdividida nas categorias *Micro*, *Mini* e *Small* (JAPCC, 2010).

Classe II: MTOW entre os 150Kg e 600 Kg. Pertencente a esta classe encontra-se apenas a categoria denominada *Tactical* (JAPCC, 2010).

Classe III: MTOW superior a 600 Kg. Esta classe subdivide-se ainda nas categorias de *Medium Altitude Long Endurance* (MALE), *High Altitude Long Endurance* (HALE) e *Strike/Combat* (JAPCC, 2010).

Tabela A-1 - Classificação NATO para os UAS (Extraído de (JAPCC, 2010))

		Peso	Altitude	Raio Ação	Exemplo
Classe I (<150Kg)	<i>Micro</i>	< 2Kg	200'	5 Km	<i>Black Widow</i>
	<i>Mini</i>	2-20 Kg	3.000'	25 Km	<i>Scan Eagle</i>
	<i>Small</i>	20-150 Kg	5.000'	50 Km	<i>Luna</i>
Classe II (>150 Kg e < 600 Kg)	<i>Tactical</i>	150-600 Kg	10.000'	200 Km	<i>Shadow,</i> <i>Hermes</i>
Classe III (>600Kg)	<i>MALE</i>	>600 Kg	45.000'	Ilimitado	<i>Heron,</i> <i>Predator</i>
	<i>HALE</i>	>600 Kg	65.000'	Ilimitado	<i>Global Hawk</i>
	<i>Strike/Combat</i>	>600 Kg	65.000'	Ilimitado	<i>Reaper</i>