



ACADEMIA DA FORÇA AÉREA

“Avaliação do Desempenho do Sensor AGL (Laser-Altímetro) como Sistema Auxiliar para Aproximação e Aterragem Automática de UAV”

Pedro Fernandes Perestrelo

Aspirante a Oficial-Aluno Piloto Aviador 137720-F

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

Júri:

Presidente: Cor/EngAer José Manuel Freitas Santiago
Orientador: TCor/EngEI Maria De Fátima Alves Nunes Bento
Coorientador: Cap/EngEI Elói Teixeira Pereira
Vogal: Maj/EngEI António Pedro Amado Matos

Sintra, março de 2015

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à minha família que, embora distante, sempre se mostrou disponível a ajudar, e por todo o apoio que me deu ao longo do meu percurso nesta academia. Agradeço igualmente à minha namorada por toda a paciência e compreensão que demonstrou durante estes meses de trabalho, assim como pelo apoio e motivação nos momentos mais complicados.

Gostaria também de agradecer a todos os elementos do CIAFA que contribuíram com o seu tempo e conhecimento para esta dissertação. Agradeço em especial:

-à minha orientadora, Tenente-Coronel Maria Nunes, por toda a disponibilidade e ajuda prestada desde as fases mais iniciais da dissertação, assim como por todos os conselhos, ajuda e apoio dados ao longo da mesma;

-ao Capitão Pedro Marques da Silva por todos os conselhos e esclarecimentos durante o desenvolvimento do *driver* para o Sensor AGL;

-ao Capitão Elói Pereira, ao Capitão Tiago Oliveira e ao Tenente Gonçalo Cruz pelos conselhos, ideias e ajuda na integração do código desenvolvido para os testes em voo na plataforma *Alfa-Extended*;

-ao Sargento-Ajudante Mendes e ao Sargento-Ajudante Santos pela ajuda na montagem do Sensor AGL na plataforma *Alfa-Extended* para os testes em voo;

-ao Major Carlos Silva, ao Sargento-Ajudante Gomes e ao Sargento-Ajudante Teixeira pela disponibilidade, ideias e ajuda durante os testes realizados no CFMTFA.

Gostaria de agradecer também ao Sargento-Ajudante Antunes do Comando Aéreo pela ajuda imprescindível na utilização do *software* ArcGIS para conversão dos dados fornecidos pelo IGeoE. Agradeço ainda ao Capitão Ramos da Academia da Força Aérea e ao Primeiro-Sargento Silva da Direção de Infraestruturas, pela disponibilidade e indispensável ajuda na marcação dos pontos de referência no CFMTFA para a realização dos testes estáticos.

Fora do contexto institucional, quero expressar o meu agradecimento à Clara Cook e ao Terry Groves da *Claud Cap Technology*, assim como ao Jason Douglas da *Latitude Engineering* por toda a ajuda e informações relativas ao Sensor AGL, essenciais ao desenvolvimento do *driver* para o mesmo.

Expresso igualmente o meu agradecimento ao Major Teodoro do Instituto Geográfico do Exército pelos conselhos e pela ajuda na seleção do tipo de dados de terreno, necessários para os testes em voo, assim como pelos esclarecimentos sobre sistemas de referenciação.

Por fim, quero agradecer a todos aqueles cujos nomes não enumerei e que direta ou indiretamente me ajudaram na realização deste trabalho, seja pelos seus conhecimentos e pelo tempo despendido, mas também pelo apoio e motivação dado e que tantas vezes faz falta.

Resumo

Os recentes avanços tecnológicos levaram ao desenvolvimento de sistemas de navegação mais precisos e de veículos aéreo não-tripulados (UAV) cada vez mais autônomos que, por sua vez, diminuíram significativamente o número de tarefas a realizar pelos operadores no solo. Com o propósito de reduzir o erro altimétrico do sistema DGPS, utilizado a bordo das plataformas *Alfa-Extended* da Força Aérea para a realização de aterragens automáticas, optou-se por utilizar um Laser-Altímetro com um erro teoricamente mais baixo. Desta forma, esta dissertação tem por objetivo a análise do desempenho do Sensor AGL, em termos de precisão e exatidão, enquanto sistema auxiliar para aproximação e aterragem automática de UAV.

Para a concretização deste objetivo começou-se por desenvolver o *driver* do Sensor AGL, seguindo-se de todo o *software* e *hardware* necessário para os testes e dos *scripts* para pós-processamento dos dados recolhidos. Posteriormente foram realizados os testes no solo e em voo, permitindo a análise do desempenho deste sensor na realização de medições sobre várias superfícies, a várias distâncias, velocidades e ângulos de incidência.

Assim, graças à metodologia seguida nesta dissertação, verificou-se uma precisão e exatidão altimétrica, por parte do Sensor AGL, claramente superior ao do sistema DGPS, registando-se um erro máximo de 0,3 m. Embora a taxa de amostragem obtida se tenha verificado inferior à anunciada pelo fabricante e tenham sido registados alguns erros em função do ângulo de incidência do feixe, estes fatores não foram considerados condicionantes para a realização de aterragens automáticas. Desta forma, concluiu-se que é vantajosa a utilização do Sensor AGL para a redução do erro altimétrico do sistema DGPS, recomendando-se que, no entanto, as medições de baixa resolução não sejam utilizadas para a aterragem e aconselhando cautela na operação sobre superfícies muito molhadas.

Palavras-chave: Laser-Altímetro; Aterragem Automática; UAV; Sensor AGL.

Abstract

Recent technological advances have led to the development of more accurate navigation systems and increasingly more autonomous unmanned aerial vehicles (UAV), which substantially reduced the ground operators' workload. In order to reduce the altitude error of the DGPS system, which is used aboard the Portuguese Air Force *Alfa-Extended* platforms to perform automatic landings, a Laser-Altimeter (whose error is theoretically lower) was used. Thus, this dissertation aims to analyze the performance of the AGL Sensor, in terms of precision and accuracy, as an auxiliary system for approach and automatic landing of UAV.

In order to meet this goal, the AGL Sensor driver was first developed, followed by all the necessary software and hardware for the tests, as well as the scripts for post-processing of the collected data. Later, the ground and flight tests were performed, thus allowing the analysis of the performance of this sensor by taking measurements on a variety of surfaces, at multiple distances, speeds and incidence angles.

The methodology employed in this dissertation revealed that the AGL Sensor altimetric precision and accuracy is clearly superior when compared with the DGPS system, registering a maximum error of 0,3m. Although the output rate achieved during the tests was lower than the one announced by the manufacturer and in spite of the existence of errors for some incidence angles, these factors were not considered restrictive for performing automatic landings. In conclusion, it was found advantageous to use the AGL Sensor to reduce the altitude error of the DGPS system. However it is recommended not to use low-resolution measurements for automatic landings, and caution is also advised when operating on very wet surfaces.

Keywords: Laser-Altimeter; Automatic Landing; UAV; AGL Sensor.

Índice

Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tabelas.....	xv
Lista de Abreviaturas.....	xvii
Glossário.....	xix
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Âmbito, Motivação e Problemática.....	2
1.3 Objetivo e Metodologia.....	3
1.4 Constrangimentos.....	4
1.5 Organização da Dissertação.....	5
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica	7
2.1 Aterragens Automáticas.....	7
2.2 Aproximações de Precisão.....	8
2.2.1 ILS.....	9
2.2.2 MLS.....	10
2.2.3 DGPS.....	11
2.3 Aterragens automáticas de plataformas UAV.....	13
2.3.1 Aterragens automáticas das plataformas do CIAFA.....	14
2.3.1.1 DGPS.....	15
2.3.2 Outros sistemas de aterragem automática para UAV.....	16
2.4 Bibliografia.....	18
Capítulo 3 - Laser-Altimetria	21
3.1 Noções de Altitudes Elipsoidal, Ortométrica e Absoluta.....	21
3.2 O Laser.....	22
3.2.1 Constituição de um Laser.....	23
3.2.2 Princípio de Funcionamento.....	23
3.2.3 Características da Luz Laser.....	24
3.2.4 Classificação dos Lasers em função da sua Potência.....	25
3.3 O Laser-Altímetro.....	26
3.3.1 Princípio de Funcionamento.....	27
3.3.2 O Princípio TOF (<i>Time of Flight</i>).....	28
3.3.3 A Refletividade.....	29
3.3.4 Vantagens e Limitações do Laser-Altímetro.....	32
3.3.5 O Sensor AGL.....	33
3.3.5.1 Características do sensor.....	33
3.3.5.2 A Interface Elétrica.....	35
3.4 Vantagens e Limitações dos sistemas DGPS e Laser-Altímetro.....	36

3.5	Bibliografia	37
Capítulo 4 -	Desenvolvimento e Implementação do Dispositivo de Testes	41
4.1	Desenvolvimento e Implementação de Software	41
4.1.1	Desenvolvimento do <i>driver</i> (biblioteca de comunicação)	41
4.1.1.1	Comunicação via Porta Série	42
4.1.1.2	Definição do Protocolo de Comunicação	43
4.1.1.3	Tipos de Pacotes	44
4.1.1.4	O Algoritmo de Leitura	46
4.1.1.5	O Algoritmo de Verificação.....	48
4.1.2	Desenvolvimento do software de Leitura.....	49
4.1.3	Desenvolvimento do <i>software</i> para o Teste em Voo.....	51
4.1.4	Pós-processamento de dados	55
4.1.4.1	Testes no Solo.....	55
4.1.4.2	Teste em Voo.....	55
4.2	Desenvolvimento e Implementação de <i>Hardware</i>	60
4.2.1	Testes no Solo	60
4.2.2	Teste em voo	62
4.3	Bibliografia.....	64
Capítulo 5 -	Testes e Análise de Resultados	67
5.1	Testes no Solo	67
5.1.1	Procedimento Pré-Ensaio	68
5.1.2	Testes Estáticos	68
5.1.2.1	Teste a várias distâncias em laboratório	68
5.1.2.2	Teste a longas distâncias	72
5.1.2.3	Teste em várias superfícies.....	78
5.1.2.4	Testes com vários ângulos de incidência.....	81
5.1.2.4.1	Teste a 3 metros	81
5.1.2.4.2	Teste a 50 metros	85
5.1.3	Testes em Movimento	88
5.1.3.1	Teste em asfalto	90
5.1.3.2	Teste em vegetação.....	92
5.2	Teste em Voo	94
5.2.1	Perfil de Voo Planeado	94
5.2.2	Procedimentos Pré-Ensaio e Pós-Ensaio.....	95
5.2.3	Resultados obtidos	96
Capítulo 6 -	Conclusões.....	99
6.1	Resultados finais e Recomendações.....	100
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	101

Índice de Figuras

Figura 1-1 - Metodologia utilizada nesta dissertação de mestrado, juntamente com os objetivos específicos inerentes a cada etapa.	3
Figura 2-1 - Imagem ilustrativa dos componentes do ILS. (Extraída de (Edwards), "Figure 39")	9
Figura 2-2 - Formato da Multiplexagem no tempo do MLS. (Extraído de (Edwards), "Figure 44:")	11
Figura 2-3 - Arquitetura de um sistema DGPS com uma estação de referência no solo. (Extraído de (Sabatini, et al., 2008), "Figure 1-1")	12
Figura 2-4 - Efeitos do erro nas trajetórias de aproximação dos sistemas ILS e DGPS. (Adaptado de (Edwards), "Figure 45")	12
Figura 2-5 - Fases da aterragem típica de uma aeronave de asa fixa. (Extraído de (Towards Autonomous Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicle Landing: A Vision-Aided Inertial Navigation under Sensor Reconfiguration Scenario, 2008), Fig. 1).	14
Figura 2-6 - Plataforma Alfa-Extended do CIAFA. (retirado de (Força Aérea Portuguesa, 2014))	14
Figura 2-7 - Erro absoluto obtido nos testes realizados com os sistemas DGPS e GPS do Piccolo. (Extraído de (Marques, 2014), "Gráfico 18")	16
Figura 2-8 - O sistema OPATS composto por todo o equipamento instalado no solo (esquerda) e pelo refletor instalado no UAV (direita). (Extraído de (RUAG Aviation), "OPATS system" e "UAV equipment")	17
Figura 2-9 - O sistema TALS composto pelo transponder e a respetiva antena (esquerda) e o equipamento de seguimento no solo (direita). (Extraído de (Sierra Nevada Corporation), "Airborne Transponder Subsystem" e "Portable Ground-based Unit")	17
Figura 2-10 - Solução do 'Intelligent Landing System' para a posição da soleira da pista 27 a partir de um sensor eletro-ótico. (Extraído de (Williams, et al., 2012), "Fig. 26")	18
Figura 3-1 - Diferenças entre o elipsoide, geoide e elevação do terreno. (Extraído de (Fraczek, 2003))	22
Figura 3-2 - Diagrama simples de uma cavidade ótica ressonante geradora de Laser. (Adaptado de (Leme, et al.), "Figura 2")	23
Figura 3-3 - Diferenças entre a luz Laser e a luz branca. (Adaptado de (Allemann, et al., 2011), "Fig. 3") ..	24
Figura 3-4 - Perfil de um feixe de Gauss (à esquerda) e de um feixe ideal em que toda a energia está contida numa área bem definida (à direita). (Adaptado de (Allemann, et al., 2011), "Fig. 7")	25
Figura 3-5 - Diagrama exemplificativo da constituição e funcionamento de um Laser-Altímetro. (Extraído de (RIEGL - Laser Measurement Systems))	27
Figura 3-6 - Determinação da distância através do princípio TOF com um pulso laser perfeito e uma superfície refletiva uniforme. (Adaptado de (Adams, et al., 2012), "Figure 2.16")	28
Figura 3-7 - A reflexão especular e difusa. (Extraído de (Mackay, 2005), "Figure 7")	29
Figura 3-8 - Múltiplas reflexões ocorridas em vegetação. (Adaptado de (Lohani, 2008) e (ESRI))	30
Figura 3-9 - Refletividade do solo argiloso húmido em função do comprimento de onda. (Extraído de (Mackay, 2005), "Figure 11")	30
Figura 3-10 - Refletividade do solo composto por gravilha seca em função do comprimento de onda. (Extraído de (Mackay, 2005), "Figure 12")	31
Figura 3-11 - Refletividade de um campo relvado (esquerda) e de um arvoredos no Outono (direita) em função do comprimento de onda. (Adaptado de (Mackay, 2005), "Figure 9; Figure 10")	31
Figura 3-12 - Refletividade da neve em função do comprimento de onda. (Extraído de (Mackay, 2005), "Figure 14")	32
Figura 3-13 - Refletividade da água em função do comprimento de onda. (Extraído de (Mackay, 2005), "Figure 13")	32
Figura 3-14 - Representação da footprint de um Radar (esquerda) e de um Laser (direita). (Adaptada de (Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing (CRISP), 2001))	33

Figura 3-15 - O Sensor AGL da Latitude Engineering. (Extraído de (Latitude Engineering, 2014))	34
Figura 3-16 - Diagrama ilustrativo do tamanho da footprint do Sensor AGL em função da distância.	34
Figura 3-17 - Diagrama ilustrativo das ligações do Sensor AGL necessárias para o seu correto funcionamento com o Piccolo: ligação à bateria e a uma porta série do Piccolo (3 pinos).	35
Figura 4-1 - Diagrama que ilustra a definição dos pacotes utilizados pelo Sensor AGL. A título de exemplo, neste diagrama é utilizado um pacote do tipo Reading.....	44
Figura 4-2 - Diagrama de possíveis dados contidos num pacote do tipo Reading. (A coluna «Valor» contém o valor do byte «Flags» em binário).....	45
Figura 4-3 - Diagrama de possíveis dados contidos num pacote do tipo Laser Mode.....	45
Figura 4-4 - Diagrama dos bytes contidos num pacote Single completo.....	46
Figura 4-5 - Diagrama da máquina de estados utilizada no algoritmo de leitura do Sensor AGL.....	47
Figura 4-6 - Software de leitura desenvolvido para o Sensor AGL em pleno funcionamento.	50
Figura 4-7 - Diagrama ilustrativo dos tópicos e nós de ROS utilizados para os testes em voo.....	52
Figura 4-8 - Representação parcial dos dados vetoriais fornecidos pelo IGeoE.	56
Figura 4-9 - Superfície interpolada da ondulação do Geoide de acordo com o modelo GeodPT08.....	57
Figura 4-10 - Superfície Interpolada da elevação do terreno na zona da Ota de acordo com os dados fornecidos pelo IGeoE.	58
Figura 4-11 - Ilustração da correção da altitude AGL em função da atitude de nariz e pranchamento da plataforma UAV.....	59
Figura 4-12 – Suporte do Sensor AGL construído para os testes no solo.	60
Figura 4-13 - Obstáculo utilizado para os testes estáticos a 90º em laboratório (ainda não forrado).	61
Figura 4-14 - Obstáculo utilizado nos testes em laboratório para vários ângulos de incidência (placa de espuma BASF Styrodur® 2500 CN).	61
Figura 4-15 - «Braço extensor» para o suporte do Sensor AGL, construído para os testes em movimento.	62
Figura 4-16 - Orifício aberto na fuselagem da plataforma para as lentes do Sensor AGL visto de cima (esquerda), e visto de baixo após a montagem do sensor (direita).	63
Figura 4-17 - Equipamento utilizado nos testes em voo e o Sensor AGL devidamente instalado.....	63
Figura 4-18 - Diagrama ilustrativo das ligações existentes entre equipamentos no decorrer dos testes em voo.....	64
Figura 5-1 - Diagrama ilustrativo do dispositivo utilizado para os testes a várias distâncias em laboratório.	69
Figura 5-2 - Gráfico que apresenta a média das leituras do Sensor AGL em função da distância (real) a que foram realizados os ensaios.	69
Figura 5-3 - Gráfico que apresenta o erro médio das leituras do Sensor AGL em função da distância (real) a que foram realizados os ensaios.	70
Figura 5-4 - Porta do hangar escolhida enquanto superfície refletora (esquerda) e pontos onde foi colocado o Sensor AGL para a realização dos vários ensaios para o teste (direita). (Imagem da direita obtida a partir da aplicação Google Earth).....	72
Figura 5-5 - Diagrama ilustrativo do dispositivo utilizado para os testes a grandes distâncias.....	73
Figura 5-6 - Gráfico do erro médio das medições em função da distância a que foram realizados os testes.	74
Figura 5-7 - Taxa de amostragem média verificada nos ensaios para o teste a longas distâncias (esquerda) e percentagem de boas leituras e leituras de alta e baixa resolução (direita).	75
Figura 5-8 - Erro médio das medições de baixa resolução obtidas nos ensaios do teste a longas distâncias, em função da distância.	75
Figura 5-9 - Erro médio das medições de alta resolução obtidas nos ensaios do teste a longas distâncias, em função da distância.	76

Figura 5-10 - Tipos de superfície em que foram realizados os testes: asfalto (esquerda) e vegetação (direita).	78
Figura 5-11 - Erro médio obtido nos ensaios do teste em várias superfícies.	79
Figura 5-12 - Percentagem de boas leituras e das leituras de alta e baixa resolução para os ensaios realizados do teste em várias superfícies.	80
Figura 5-13 - A frequência de amostragem obtida para cada um dos ensaios do teste em várias superfícies.	80
Figura 5-14 - Diagrama ilustrativo do dispositivo utilizado para os ensaios do teste a 3 metros a para vários ângulos de incidência em laboratório.	82
Figura 5-15 - Gráfico com o erro médio das medições obtidas no teste para vários ângulos de incidência, em função do ângulo de incidência.	83
Figura 5-16 - Diagrama explicativo da profundidade da footprint para o ensaio a 85° a 3 metros de distância.	83
Figura 5-17 - Taxa de amostragem média verificada nos ensaios para o teste a 3 metros em laboratório para vários ângulos de incidência (esquerda) e percentagem de boas leituras e leituras de alta e baixa resolução (direita).	84
Figura 5-18 - Pontos a partir dos quais foram realizadas as medições nos ensaios a 50m para vários ângulos de incidência. (Imagem obtida a partir da aplicação Google Earth)	85
Figura 5-19 - Diagrama ilustrativo do dispositivo utilizado para os ensaios do teste para vários ângulos de incidência a 50 metros.	85
Figura 5-20 - Erro médio das medições obtidas no teste a 50 metros para vários ângulos de incidência, em função do ângulo de incidência.	86
Figura 5-21 - Taxa de amostragem média verificada nos ensaios para o teste a 50 metros para vários ângulos de incidência (esquerda) e a percentagem de boas leituras e leituras de alta e baixa resolução (direita).	88
Figura 5-22 - Dispositivo utilizado para a realização dos testes em movimento no solo.	89
Figura 5-23 - Erro médio das leituras obtidas nos ensaios em asfalto, em função da velocidade.	90
Figura 5-24 - A frequência de amostragem média obtida durante os ensaios em asfalto, em função da distância.	91
Figura 5-25 - Erro médio das leituras obtidas nos ensaios sobre vegetação, em função da velocidade.	92
Figura 5-26 - A frequência de amostragem média obtida durante os ensaios sobre vegetação, em função da distância.	93
Figura 5-27 - Traçado terreno do segundo voo realizado. (obtido a partir da aplicação Google Earth)	95

Índice de Tabelas

Tabela 2-1 - Categorias de aproximações de precisão. Informação retirada de (ICAO, 2010).	8
Tabela 3-1 - Classificação dos lasers de acordo com o padrão IEC60825-1. Informação retirada de (Rockwell Laser Industries) e (Sensor Central).	26
Tabela 3-2 - <i>Descrição da funcionalidade de cada um dos pinos do conector do Sensor. AGL (Adaptado de (Latitude Engineering, 2008), "Table 2")</i>	35
Tabela 3-3 - Tabela comparativa entre os sistemas DGPS e Laser-Altímetro. (Informações extraídas de (Sabatini, et al., 2008), (Beamish, et al., 2010), (Mackay, 2005) e (Mattei, et al., 2003)).....	36
Tabela 4-1 - Tipos de pacotes suportados pelo Sensor AGL.	44
Tabela 4-2 - Descrição dos campos assinalados na GUI da Figura 4-6.....	50
Tabela 4-3 - Estrutura da mensagem 'Leitura_AGL_msg' publicada no tópico 'agl_raw_readings' pelo nó 'agl_raw_readings'.....	53
Tabela 4-4 - Estrutura da mensagem 'AutopilotTelemetry' publicada no tópico 'autopilot_telemetry' pelo nó 'autopilot_driver'.....	53
Tabela 4-5 - Estrutura da mensagem 'Dados_log' publicada no tópico 'agl_data_log' pelo tópico 'agl_fusao'.	54
Tabela 5-1 - Resultados obtidos nos ensaios do teste a várias distâncias em laboratório.....	71
Tabela 5-2 - Resultados conjuntos obtidos nos ensaios do teste a longas distâncias.	74
Tabela 5-3 – Leituras de alta resolução obtidas nos ensaios do teste a longas distâncias.....	77
Tabela 5-4 - Resultados obtidos nos ensaios do teste em várias superfícies.	79
Tabela 5-5 - Resultados obtidos nos ensaios do teste em laboratório a 3 metros para vários ângulos de incidência.	82
Tabela 5-6 - Resultados obtidos nos ensaios do teste a 50 metros para vários ângulos de incidência.	87
Tabela 5-7 - Resultados obtidos nos ensaios em asfalto para várias velocidades.....	91
Tabela 5-8 - Resultados obtidos nos ensaios em asfalto para várias velocidades.....	92

Lista de Abreviaturas

AGL	<i>Above Ground Level (Altitude acima do nível do solo);</i>
AMSL	<i>Above Main Sea Level (Altitude acima do nível médio das águas do mar);</i>
ARP	<i>Aerodrome Reference Point;</i>
CFMTFA	<i>Centro de Formação Militar e Técnica da Força Aérea;</i>
CIAFA	<i>Centro de Investigação da Academia da Força Aérea;</i>
DEM	<i>Digital Elevation Model (Modelo de Elevação Digital);</i>
DGPS	<i>Differential Global Positioning System (GPS Diferencial);</i>
DH	<i>Decision Height (Altura de Decisão);</i>
DTM	<i>Digital Terrain Model (Modelo de Terreno Digital);</i>
EASA	<i>European Aviation Safety Agency;</i>
ESA	<i>European Space Agency;</i>
ESAC	<i>Earth Science Advisory Committee;</i>
FP7	<i>7th Framework Programme;</i>
GAST-D	<i>GBAS Approach Service Type D (Serviço de Aproximação GBAS do tipo D);</i>
GBAS	<i>Ground-Based Augmentation System;</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System;</i>
GPS	<i>Global Positioning System;</i>
GUI	<i>Graphical User Interface (Interface gráfica);</i>
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization;</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission;</i>
IGeoE	<i>Instituto Geográfico do Exército;</i>
ILS	<i>Instrument Landing System;</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation;</i>
LIDAR	<i>Light Detection And Ranging;</i>
MLS	<i>Microwave Landing System;</i>
NIR	<i>Near-Infrared (Radiação infravermelha próxima);</i>

OOP	<i>Object-Oriented Programming (Programação Orientada a Objetos);</i>
OPATS	<i>Object Position and Tracking System;</i>
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;
QREN	Quadro de Referência Estratégica Nacional;
SEAGULL	Sistemas Inteligentes de Suporte ao Conhecimento Situacional Marítimo baseados em Veículos Aéreos não Tripulados;
SNR	<i>Signal-to-noise ratio (Relação sinal-ruído);</i>
TALS	<i>Tactical Automatic Landing System;</i>
TEM	<i>Transverse Electromagnetic Mode</i> (Modo Transversal Eletromagnético);
TOF	<i>Time Of Flight;</i>
UAS	<i>Unmanned Aircraft System</i> (Sistema Aéreo Não-Tripulado);
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i> (Veículo Aéreo Não-Tripulado);
WGS	<i>World Geodetic System;</i>

Glossário

- (1) **Altitude absoluta.** Também conhecida por altitude acima do nível do solo (AGL), corresponde á distância vertical entre um ponto e o terreno imediatamente sobre este.
- (2) **Altitude elipsoidal.** Corresponde à distância vertical entre um ponto e o elipsoide de referência.
- (3) **Altitude ortométrica.** Corresponde à distância vertical entre um ponto e o geoide.
- (4) **Aterragem automática.** É uma aterragem realizada pelos sistemas instalados na aeronave e no exterior desta, sem a intervenção do piloto.
- (5) **Aterragem autónoma.** É uma aterragem realizada sem recurso a equipamento auxiliar instalado no solo.
- (6) **Autoland.** É um sistema que permite o controlo automático da aeronave durante a aproximação e aterragem.
- (7) **Decision Height (Altura de decisão).** A altura especificada numa aproximação de precisão, a partir da qual o procedimento de aproximação falhada deve ser executado caso não haja contacto visual com a referência determinada.
- (8) **Difração.** Fenómeno que ocorre quando uma onda encontra um obstáculo da ordem de grandeza do seu comprimento de onda.
- (9) **Driver.** Corresponde a um *software* que permite operar ou controlar um determinado dispositivo conectado ao computador.
- (10) **Elipsoide de referência.** Corresponde a uma superfície definida matematicamente que se aproxima a um geoide.
- (11) **Erro Aleatório.** São erros imprevisíveis que não podem ser corrigidos, mas que tendem a anular-se num elevado número de amostras.
- (12) **Erro Sistemático.** São erros que ocorrem sempre no mesmo sentido e estão sempre presentes, podendo ser corrigidos ou anulados.
- (13) **Exatidão.** Indica a proximidade das medições ao valor real.
- (14) **Filtro de Kalman.** Método matemático utilizado para gerar resultados que tendam a aproximar-se dos valores reais das grandezas medidas, reduzindo o erro.

- (15) **Firmware.** Um conjunto de instruções que são programadas diretamente em equipamentos eletrônicos aquando do seu fabrico, essenciais ao seu bom funcionamento.
- (16) **Footprint.** Corresponde à área do obstáculo que é iluminada pelas ondas eletromagnéticas emitidas.
- (17) **Geoide.** Corresponde à superfície equipotencial no planeta Terra, representando a forma que a superfície dos oceanos assume quando sujeita apenas à gravidade e à rotação do planeta. Desta forma, coincide com o nível médio das águas do mar.
- (18) **Ground Station.** Estação no solo utilizada para comunicar com o *Piccolo* em voo.
- (19) **Inversão de população.** Fenómeno físico que ocorre no meio ativo contido no interior da cavidade ressonante dos Lasers, consistindo na existência de mais átomos num estado de energia superior, do que num inferior.
- (20) **Ladeira ideal.** Percurso ideal no plano vertical a ser percorrido por uma aeronave durante a aterragem.
- (21) **Luz coerente.** Luz cujas ondas eletromagnéticas se encontram em fase em relação ao tempo e ao espaço.
- (22) **Luz colimada.** Luz cujas ondas eletromagnéticas que a compõem são paralelas entre si.
- (23) **Luz monocromática.** Luz cujas ondas eletromagnéticas têm um único comprimento de onda.
- (24) **Software Multiplataforma.** São softwares que estão preparados para ser utilizados em várias plataformas (ex. Windows, Linux, ...).
- (25) **Operações All-Weather.** Qualquer movimento à superfície, descolagem, saída, aproximação e aterragem realizadas em condições cujas referências visuais estejam limitadas pelas condições atmosféricas.
- (26) **Piccolo.** Piloto-automático para UAS produzido pela *Cloud Cap Technologies*, utilizado nas plataformas operadas pelo CIAFA.
- (27) **Piloto-Automático.** É um sistema que permite guiar e controlar a aeronave durante o voo sem que seja necessária uma interação constante por parte do piloto.
- (28) **Pranchamento (roll).** Corresponde ao ângulo que a linha que une a ponta da asa esquerda e a ponta da asa direita faz com o horizonte.

- (29) **Precisão.** Indica a proximidade das medições umas das outras.
- (30) **Radar-Altímetro.** É um instrumento que utiliza ondas rádio para determinar a altitude AGL a que uma aeronave se encontra.
- (31) **Raster.** É uma grelha que contém o valor da elevação para uma determinada latitude e longitude.
- (32) **Rota.** Corresponde à direção sobre o solo que a aeronave está a tomar.
- (33) **Script.** Uma sequência de comandos a serem executados pelo computador.
- (34) **Software.** Vulgarmente conhecido por «programa de computador», corresponde a um conjunto de instruções que direcionam o processador de um computador a realizar determinadas operações.
- (35) **Standard.** Referência padrão.
- (36) **Taxiway (Caminho de rolagem).** Caminho destinado à rolagem de aeronaves num aeródromo, constituindo estes uma ligação entre vários pontos do mesmo.
- (37) **Timeouts.** Tempo máximo em que determinado evento tem de ocorrer.
- (38) **Transponder.** Equipamento a bordo da aeronave que emite uma resposta via radiofrequência ao receber uma «interrogação» por parte de um radar.

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Enquadramento

Ao longo dos últimos anos tem-se assistido a um notável aumento do desenvolvimento, produção e utilização de UAV por todo o mundo. Estas plataformas, tendo flexibilidade para ser empregues numa grande diversidade de cenários, permitem a realização de várias tarefas que, anteriormente, apenas podiam ser realizadas por aeronaves tripuladas. Estas tarefas vão, hoje, desde a fotografia aérea à vigilância marítima em âmbito civil, e desde o reconhecimento do teatro de operações até o ataque ao solo em âmbito militar. É também notável uma maior tendência em utilizar UAV face a aeronaves tripuladas, em determinadas tarefas, algo que é justificado pelo seu reduzido custo de operação, pela capacidade de emprego em ambientes perigosos sem pôr desnecessariamente vidas em risco e pela sua versatilidade, podendo ser transportados na bagageira de uma viatura, montadas no local e colocadas em voo sem a necessidade de um terreno especialmente preparado (como uma pista).

Em particular na Força Aérea, cabe hoje ao Centro de Investigação da Academia da Força Aérea (CIAFA) a construção de plataformas UAV de classes I e II e o seu desenvolvimento a nível de *software*, comunicações, sistemas de decisão e controlo, sistemas de navegação e fusão de dados, entre outros. Este Centro conta já com cerca de 500 horas de voo e 900 voos autónomos realizados, utilizando três tipos de UAS nele desenvolvidos: a *Asa-Voadora* e o *Mini-UAS tático* (nível 0/classe I), as plataformas *Alfa* e *Alfa-Extended* (nível 1/classe I) e a plataforma *Antex* (nível 2/classe II). É também de importante destaque a participação do CIAFA no projeto PITVANT, financiado pelo Ministério da Defesa Nacional e com o objetivo de desenvolver tecnologia para veículos aéreos não tripulados de pequena e média dimensão, no projeto PERSEUS, financiado pelo FP7 e com o objetivo de integrar tecnologia inovadora para implementação de um sistema de vigilância do perímetro marítimo da União Europeia, e no projeto SEAGULL, financiado pelo QREN e com o objetivo de desenvolver tecnologia associada a veículos aéreos não tripulados para a geração de conhecimento situacional marítimo.

1.2 Âmbito, Motivação e Problemática

Graças aos largos progressos a nível da tecnologia UAV e dos sistemas de navegação, evoluiu-se de plataformas que necessitavam de pilotos no solo a controlá-las remotamente, para plataformas que têm, atualmente, um elevado grau de autonomia desde a descolagem até à aterragem. Desta forma as plataformas dos UAS tornaram-se mais seguras, mais simples de operar e o número de tarefas a realizar pelo operador foi reduzido.

As aeronaves operadas pelo CIAFA, tendo a bordo o piloto-automático *Piccolo* produzido pela *Cloud Cap Technology*, encontram-se aptas para realizar a rolagem, descolagem, voo e aterragem de forma automática. Este sistema tem incorporado um recetor GPS que, aliado a sensores inerciais e barométricos, determina a posição do UAV, permitindo a realização de toda a navegação necessária ao longo do voo. No entanto, uma vez que para a realização de aterragens automáticas é necessário que o erro da posição determinada pelos sistemas a bordo seja o menor possível, o *Piccolo* só realiza aterragens automáticas na presença dos sistemas DGPS e/ou Laser-Altímetro instalados a bordo. Presentemente, para a realização deste tipo de aterragens, este Centro apenas possui o sistema DGPS instalado nas suas plataformas. No entanto, ensaios realizados no âmbito de outra dissertação de mestrado com o objetivo de validar este sistema, concluíram que o erro altimétrico médio do DGPS é de cerca de 75cm¹. Assim, tendo em conta a pequena dimensão dos UAS do CIAFA, um erro desta ordem de grandeza poderia ter resultados catastróficos, pelo que a realização de aterragens automáticas apenas com recurso a este sistema é limitada em determinadas situações¹.

Deste modo, tornou-se de extrema relevância para o CIAFA encontrar um sensor que permitisse reduzir o erro altimétrico do sistema DGPS, conduzindo a aterragens automáticas mais seguras e mais suaves. A solução sugerida foi a de utilizar o Sensor AGL, um Laser-Altímetro previamente adquirido pelo CIAFA e com um erro altimétrico teoricamente mais baixo, enquanto sistema auxiliar do DGPS na aterragem automática da plataforma *Alfa-Extended*. Neste sentido, foi formulada a seguinte pergunta de partida:

¹ Marques, Pedro Gonçalo. 2014. *Validação de um sistema DGPS para navegação de UAV's do projeto PITVANT*. Sintra : Academia da Força Aérea, 2014.

“Em que medida é que é vantajoso utilizar o Sensor AGL enquanto sistema auxiliar para aproximação e aterragem automática de UAV?”

1.3 Objetivo e Metodologia

Tendo em conta a situação apresentada, esta dissertação tem por objetivo **avaliar, em termos de precisão e exatidão, o desempenho do Sensor AGL enquanto sistema auxiliar para aproximação e aterragem automática de UAV.**

No sentido de cumprir esta meta, delineou-se a metodologia a ser seguida ao longo desta dissertação. No diagrama que se segue, é possível observar todas as etapas definidas, acompanhadas pelos objetivos específicos a elas associadas.

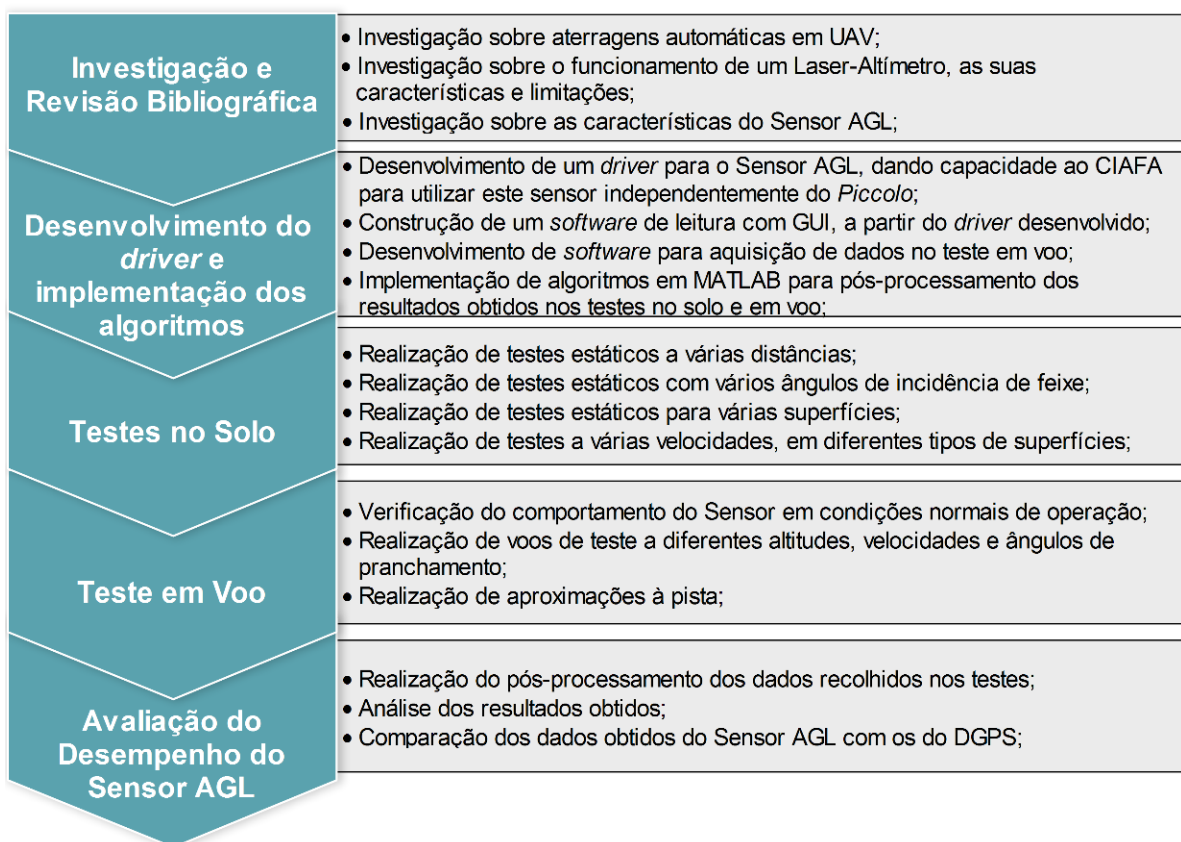


Figura 1-1 - Metodologia utilizada nesta dissertação de mestrado, juntamente com os objetivos específicos inerentes a cada etapa.

A primeira etapa consiste na realização de investigação acerca do estado da arte de tópicos importantes para este trabalho. Inclui-se assim a investigação sobre aterragens automáticas, tanto em aeronaves tripuladas como em UAV, sobre os princípios de funcionamento de um Laser-Altímetro, as suas vantagens e limitações e, por fim, sobre as características do Sensor AGL da *Latitude Engineering*.

A segunda etapa diz respeito ao desenvolvimento de todo o *software* necessário para a realização de testes. São, neste sentido, desenvolvidos o *driver* para o Sensor AGL, o *software* de leitura com GUI para a realização de testes no solo, o *software* para aquisição de dados em voo e, por fim, são implementados os *scripts* em MATLAB para a realização do pós-processamento dos dados recolhidos. Nesta etapa, inclui-se também o desenvolvimento de todo o hardware necessário para a realização dos testes.

Já as etapas três e quatro consistem na realização de vários testes no solo e em voo, com o objetivo de recolher medições do sensor para posterior análise. A quinta, e última etapa, consiste na realização do pós-processamento dos dados recolhidos e respetiva análise, tendo em vista o cumprimento do objetivo principal da dissertação e, conseqüentemente, dar resposta à pergunta de partida.

1.4 Constrangimentos

Ao longo desta dissertação, um dos fatores limitadores encontrados foi a inexistência de literatura acessível que abordasse os requisitos necessários para aterragens automáticas realizadas por UAV. Devido a este facto, para avaliação da performance do Sensor AGL, tiveram de ser utilizados valores de referência provenientes de outra dissertação de mestrado.

Do ponto de vista técnico, foi também um constrangimento a ausência de uma licença de Laser-Altímetro no *Piccolo* da plataforma utilizada, situação que impediu a realização de testes com o dispositivo normal de voo - o Sensor AGL conectado ao *Piccolo* - e a realização de aterragens automáticas com recurso a este sensor. Igualmente, a ausência de um recetor GPS independente enquanto referência para os testes em voo, impediu que houvesse uma comparação mais objetiva entre os valores de altitude dos sistemas DGPS e Laser-Altímetro. Por outro lado, os testes no solo foram limitados pela impossibilidade de utilizar um suporte, para posicionamento do Sensor AGL, que permitisse um maior grau de precisão na realização dos mesmos.

A nível logístico, foi um aspeto limitador a falta de disponibilidade para a realização de mais voos de teste e de ensaios em movimento mais longos, impedindo, assim, a recolha de mais dados para análise. Por outro lado, foi impraticável a utilização da mesma superfície refletora em todos os testes estáticos no solo, uma vez que esta teria de ter dimensões que dificultariam o seu transporte.

1.5 Organização da Dissertação

Para uma mais fácil leitura e organização de conteúdos, esta dissertação foi dividida em seis capítulos.

No primeiro capítulo, tendo em vista a contextualização do leitor, é feita uma curta panorâmica sobre a utilização de UAV no mundo, e em particular na Força Aérea Portuguesa, referindo algumas das suas vantagens. Seguidamente é apresentado o âmbito e a motivação desta dissertação, bem como a problemática a que esta vem dar resposta. São então apresentados os objetivos e a metodologia delineada, bem como os constrangimentos encontrados ao longo deste trabalho.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica, abordando as aterragens automáticas de uma forma geral, as aproximações de precisão e as aterragens automáticas de plataformas UAV. Dentro desta última, são abordadas, em particular, as aterragens automáticas com as plataformas operadas pelo CIAFA, sendo estas de elevada pertinência no âmbito desta dissertação.

No capítulo seguinte estão presentes os conceitos considerados essenciais à compreensão do funcionamento de um Laser-Altímetro. São abordados os conceitos de altitude elipsoidal, ortométrica e absoluta, passando em seguida para os princípios de funcionamento das tecnologias Laser e Laser-Altímetro, abordando as suas principais vantagens e limitações. Por fim, são apresentadas as características do Sensor AGL, o sensor em análise nesta dissertação.

No capítulo número quatro são apresentados todos os desenvolvimentos realizados no âmbito desta dissertação para a satisfação das necessidades dos testes planeados. A nível do *software* é descrito o desenvolvimento da biblioteca de comunicação, do *software* de leitura (com GUI), do software para o teste em voo e dos *scripts* em MATLAB para pós-processamento de dados. A nível de *hardware*, é apresentado todo o material auxiliar utilizado na realização dos testes no solo, bem como a descrição da instrumentação do UAV para o teste em voo.

No penúltimo capítulo são explicados todos os testes realizados, no solo e em voo, descrevendo o dispositivo utilizado, as referências utilizadas e apresentando os resultados obtidos. Para cada um deles é feita a análise dos dados obtidos, avaliando o desempenho do sensor e referindo as possíveis causas para os erros encontrados.

Por fim, no último capítulo, é feito um pequeno resumo de todo o trabalho realizado no âmbito desta dissertação, apresentando as conclusões obtidas a partir dos testes concretizados. São também referidas algumas recomendações e feitas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

Desde que o homem começou a utilizar o meio aéreo para as mais variadas tarefas, militares e civis, o volume de tráfego aéreo e a sua complexidade têm vindo a aumentar (Eurocontrol, 2013), assim como a dependência mundial nos veículos que utilizam este meio (The Economic Importance of Air Travel In High-Amenity Rural Areas, 2009). Desta forma, nasceu a necessidade de encontrar soluções que minimizassem as condicionantes meteorológicas, principalmente a nível da visibilidade. Surgiu assim o conceito de operações *All-Weather*, ou seja, a operação de aeronaves, desde a descolagem até à aproximação (inclusive), em situações em que as referências visuais estejam limitadas pelas condições atmosféricas. Para que este tipo de operação seja possível, principalmente nas fases de aproximação e aterragem, é essencial que os instrumentos e sistemas necessários estejam instalados, tanto no solo como a bordo das aeronaves, e que a tripulação esteja devidamente treinada para operar nestas condições (ICAO, 2013).

2.1 Aterragens Automáticas

O *Autoland* é um sistema automático desenhado para operar na fase final do voo de uma aeronave: a aterragem (CASA, 2012). Considera-se uma aterragem automática como aquela que é realizada pelos sistemas instalados na aeronave e no exterior desta, sem a intervenção do piloto. A primeira aterragem automática em condições de visibilidade CAT IIIA, apesar dos diversos testes bem-sucedidos já desde 1962, apenas foi realizada a 9 de Janeiro de 1969 por um *Caravelle*, dois meses após a sua aprovação operacional. Porém, para que uma aeronave possa realizar este tipo de aterragem com o nível de segurança exigido, é necessário que esta, o aeródromo, a tripulação e o operador estejam devidamente certificados e respeitem os regulamentos em vigor (Airbus Industrie, 2001).

A EASA (*European Aviation Safety Agency*) refere nas suas especificações para operações *All-Weather*, que não é aceitável que uma aterragem automática seja menos segura que a aterragem manual. Neste sentido, para que um sistema seja aprovado para este tipo de operação, a sua performance deve ser tal, que seja muito pouco provável a aeronave aterrar a menos de 60 metros ou a mais de 823 metros do início da pista, ou com o trem de aterragem mais exterior a mais de 21 metros da linha central (para uma pista de 45m). É também necessário a utilização de um sensor

capaz de fornecer a altitude AGL (*Above Ground Level*) da aeronave, como um Radar-Altímetro, cuja instalação deve ser feita de forma a que a probabilidade deste fornecer uma altitude incorreta seja muito remota (EASA, 2003). Em caso de falha, o sistema de aterragem automática pode ser de dois tipos: passivo ou operacional. Sendo do tipo passivo (denominado *fail-passive*), em caso de falha, não é possível aterrar a aeronave automaticamente e o piloto tem de assumir o controlo desta. Sendo do tipo operacional (denominado *fail-operational*), mesmo com falha, a aterragem é realizada automaticamente com a restante parte do sistema (Airbus Industrie, 2001).

Contudo, para que este tipo de aterragens possam ser realizadas, foi necessário o prévio desenvolvimento de ajudas rádio de precisão, capazes de encaminhar a aeronave até à pista.

2.2 Aproximações de Precisão

A aproximação corresponde à fase do voo que antecede a aterragem e está, na generalidade dos casos, desenhada para um ângulo de descida de 3º rumo ao eixo da pista e com início a 4 milhas da soleira da mesma (Edwards). Relativamente ao tipo de guiamento que é fornecido à aeronave, as aproximações por instrumentos podem ser classificadas em três tipos: aproximações de não precisão, aproximações com guiamento vertical e aproximações de precisão. Nas aproximações de não precisão apenas é fornecido guiamento lateral à aeronave, ou seja, informação relativa à posição da aeronave no plano horizontal. Nas aproximações com guiamento vertical é utilizado guiamento lateral e vertical, mas sem atingir os requisitos estabelecidos para uma aproximação de precisão. Nas aproximações de precisão é utilizado guiamento lateral e vertical de acordo com os mínimos estabelecidos para a categoria de operação utilizada. Estas categorias, definidas pela ICAO (*International Civil Aviation Organization*), determinam em que condições de visibilidade e de teto é que cada aproximação pode ser tentada (ver Tabela 2-1), sendo a CAT I a menos precisa e a CAT IIIC a mais precisa (ICAO, 2013).

Tabela 2-1 - Categorias de aproximações de precisão. Informação retirada de (ICAO, 2010).

Categorias de Aproximação	Visibilidade	DH (<i>Decision Height</i>)
CAT I	Não inferior a 800m ou RVR não inferior a 550m	Não inferior a 60m
CAT II	RVR não inferior a 300m	Não inferior a 30m

CAT IIIA	RVR não inferior a 175m	Inferior a 30m ou sem DH
CAT IIIB	RVR não inferior a 50m	Inferior a 15m ou sem DH
CAT IIIC	Sem limitações	Sem DH

Atualmente, os principais sistemas de aproximação de precisão são considerados como sendo o *Instrument Landing System* (ILS), o *Microwave Landing System* (MLS) e a utilização de GNSS (*Global Navigation Satellite System*) conjuntamente com GBAS (*Ground-Based Augmentation System*).

2.2.1 ILS

O ILS ou *Instrument Landing System* foi desenvolvido logo após a Segunda Guerra Mundial e é, atualmente, o *standard* ICAO para ajudas rádio de precisão. Esta ajuda rádio permite orientar de forma precisa, aeronaves na fase de aproximação até uma determinada pista. Relativamente a equipamentos no solo, o ILS é composto por três componentes principais: o *Localizer*, o *Glide Slope* (ou *Glide Path*) e os Marcadores (ver Figura 2-1).

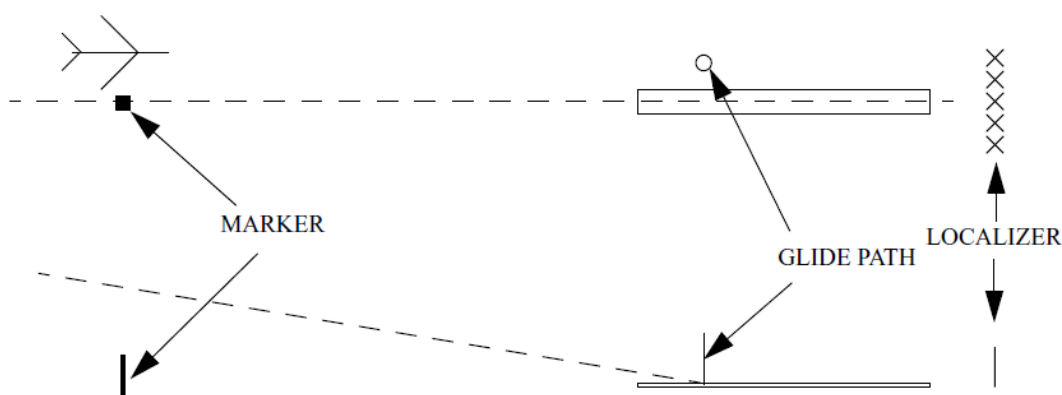


Figura 2-1 - Imagem ilustrativa dos componentes do ILS. (Extraída de (Edwards), "Figure 39")

O *Localizer*, sendo constituído por um conjunto de antenas colocadas a cerca de 1000 pés da cabeceira da pista, é responsável pelo guiamento horizontal da aeronave em aproximação. Tal é conseguido através da emissão, por este, de dois sinais rádio modulados em amplitude (um a 90Hz e outro a 150Hz). O equipamento a bordo da aeronave, recebendo estes dois sinais, calcula a diferença de profundidade de modulação e, a partir dessa informação, determina se a aeronave se encontra dentro

ou fora da rota pretendida (à direita ou à esquerda), indicando quantos graus está desviada (Edwards).

O *Glide Slope* tem uma função semelhante à do *Localizer*, mas no que diz respeito ao guiamento vertical da aeronave ao longo da aproximação. É composto por um conjunto de antenas montadas verticalmente a cerca de 1000 pés da soleira de pista e a 400-500 pés da berma da pista, emitindo dois sinais modulados em amplitude (um a 90Hz e outro a 150Hz). O equipamento a bordo da aeronave, ao receber estes dois sinais, calcula a diferença de profundidade de modulação e determina se a aeronave se encontra acima ou abaixo da ladeira ideal de descida, indicando quantos graus se encontra desviada (Edwards).

Os Marcadores, por sua vez, são antenas no solo que radiam verticalmente na frequência de 75MHz. Geralmente existem três marcadores em cada aproximação ILS: o *Outer Marker*, o *Middle Marker* e o *Inner Marker*. O *Outer Marker* está situado a 4 milhas da soleira de pista e indica ao piloto o ponto para dar início à descida final para a aterragem. O *Middle Marker* está localizado a 0,5 milhas da soleira de pista e constitui o ponto de decisão para as aproximações CAT I. O *Inner Marker* está situado a 1000 pés da soleira de pista e define o ponto de decisão para as aproximações CAT II (Edwards).

2.2.2 MLS

O MLS ou *Microwave Landing System* foi desenvolvido em meados dos anos 70 com o intuito de substituir o ILS. Este sistema veio corrigir algumas das lacunas do ILS como é o caso do baixo número de canais disponíveis e as dificuldades em atingir os requisitos de aproximação CAT II e CAT III. O MLS, embora dispendioso, tem mais canais disponíveis, é menos suscetível a interferências e possibilita a seleção de um azimute (+/- 40°) e da ladeira de aproximação (Edwards).

Esta ajuda rádio, no que diz respeito ao seu funcionamento, utiliza uma técnica de multiplexagem no tempo. Por outras palavras, o tempo disponível está dividido em intervalos mais pequenos e as diversas funcionalidades do sistema estão distribuídas por esses mesmos intervalos conforme o necessário. O guiamento lateral é feito através da medição do tempo entre impulsos recebidos pela aeronave, uma vez que o diagrama de radiação do MLS varre os azimutes de operação num período

constante (e definido pela ICAO). As restantes informações são enviadas nos restantes intervalos de tempo (Edwards), tal como ilustra a Figura 2-2.

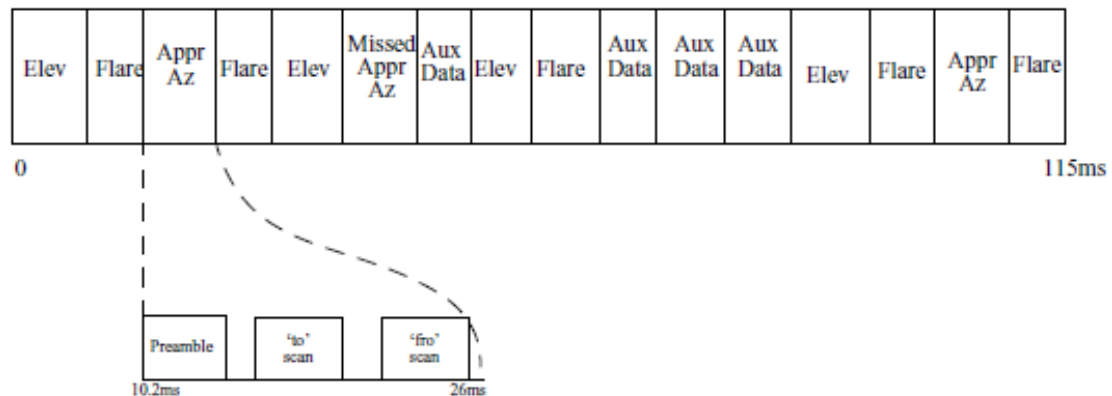


Figura 2-2 - Formato da Multiplexagem no tempo do MLS. (Extraído de (Edwards), "Figure 44.")

2.2.3 DGPS

O GPS, ou *Global Positioning System*, é um sistema passivo do tipo GNSS que utiliza os sinais recebidos de uma constelação de 24 satélites para, através da medição de tempos e a partir do método de triangulação, fornecer ao utilizador a sua posição em tempo real. Este sistema está disponível em qualquer parte do globo e pode ter um número ilimitado de utilizadores em simultâneo (Sabatini, et al., 2008). No entanto, o GPS por si só tem uma precisão de 20 metros (Federal Geodetic Control Subcommittee (FGCS)) devido a: erros de propagação na ionosfera, ruído, erros nas efemérides e na sincronização dos relógios, entre outros (Sabatini, et al., 2008).

O DGPS (GPS Diferencial ou *Differential Global Positioning System*) foi posteriormente desenvolvido para colmatar as falhas, a nível de precisão e medição de distâncias, do GPS *stand-alone*. Este sistema envolve a utilização de um recetor de referência numa posição conhecida (GBAS, *Ground-Based Augmentation System*, no caso do recetor estar no solo), capaz de medir os erros GPS. Assim, considerando que os erros são os mesmos para uma determinada área, é possível efetuar as correções para os recetores que se encontrem nas proximidades, obtendo precisões comparáveis aos atuais sistemas de aterragem de precisão (Sabatini, et al., 2008).

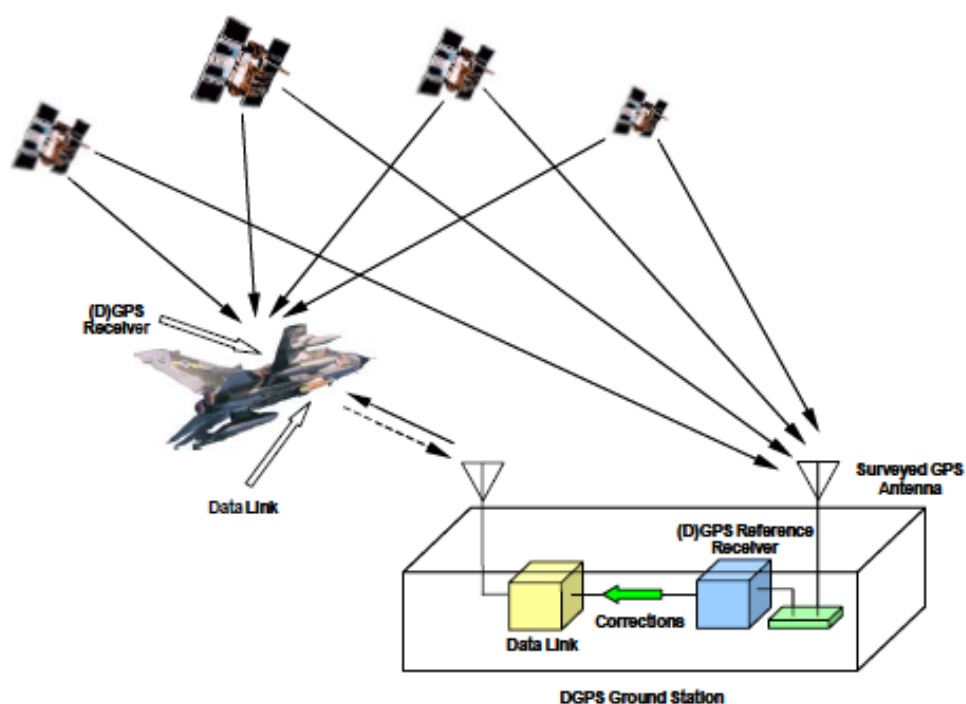


Figura 2-3 - Arquitetura de um sistema DGPS com uma estação de referência no solo. (Extraído de (Sabatini, et al., 2008), "Figure 1-1")

No entanto, um dos potenciais problemas do DGPS face ao ILS (sistema de aterragem de precisão de referência), reside no tipo de coordenadas que cada um destes sistemas utiliza. Enquanto o ILS opera com um sistema de coordenadas angulares (esféricas) e os parâmetros de performance estão definidos por ângulos, o DGPS opera em coordenadas cartesianas. Assim, e embora o erro vertical admissível seja derivado do equivalente erro angular do ILS, a trajetória admissível para a aproximação é diferente nos dois sistemas (ver Figura 2-4) (Edwards). Isto faz com que, para categorias de aproximação superiores (CAT II e III), seja necessário manter uma melhor performance durante toda a aproximação DGPS (Lipp, 2010).

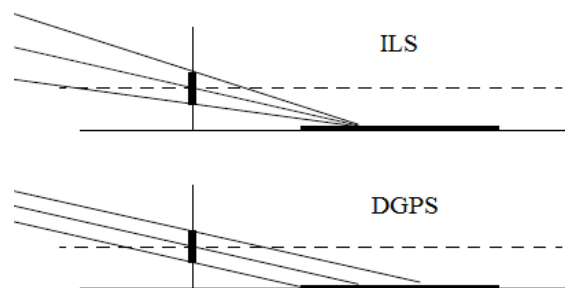


Figura 2-4 - Efeitos do erro nas trajetórias de aproximação dos sistemas ILS e DGPS. (Adaptado de (Edwards), "Figure 45")

Com início em 2005, o projeto ANASTASIA levou a cabo investigações acerca de futuras tecnologias e arquiteturas de sistemas de navegação, com o intuito de

desenvolver recetores GNSS de nova geração para todas as fases de voo (ANASTASIA Consortium, 2009). Para aproximações de CAT IIIb, este projeto previu que seria necessária uma precisão de 3,6m a nível lateral/horizontal e 1,0m a nível vertical (ANASTASIA Consortium, 2006). No entanto, atualmente, as aproximações de precisão por DGPS de CAT II e CAT III (GBAS *Approach Service Type D* ou GAST-D) e os seus parâmetros de performance ainda estão em revisão por parte da ICAO devido a problemas na sua aprovação a nível prático (Lipp, 2010).

2.3 Aterragens automáticas de plataformas UAV

Nos dias de hoje, grande parte dos UAV (*Unmanned Air Vehicles*) de grandes dimensões são controlados remotamente, por pilotos treinados, durante a fase da aterragem. No entanto, a atual interface de controlo entre o UAV e o ser humano tem as suas limitações: há uma perda da visão periférica e da noção de profundidade por parte do piloto, e este não consegue ouvir os sons nem sentir as vibrações e as acelerações da aeronave que está a controlar. Noutros termos, considera-se que há uma falta de 'realismo', o que pode levar os pilotos a sentir que estão a operar um simulador ou um jogo de computador. Assim, e dado que a navegação automática consegue melhores resultados que a operação remota do UAV, surgiu a necessidade de encontrar soluções automáticas para aquela que é considerada como a fase mais crítica e delicada do voo de um UAV: a aterragem (Roke Manor Research Limited, 2011).

O procedimento de aterragem de um UAV de asa fixa é muito semelhante ao realizado por uma aeronave tripulada, podendo ser dividido em três fases: a aproximação (*approach*), a ladeira de descida (*glideslope*) e o arredondar (*flare*). Na fase da aproximação é iniciada a descida para uma altitude inferior e a velocidade é reduzida para a velocidade de aproximação de referência do UAV. Quando a velocidade de descida da aeronave estabiliza para um valor constante, considera-se que esta está na ladeira de descida. Nesta fase, o percurso percorrido pela plataforma deverá fazer um ângulo de cerca de 3° em relação ao solo, em direção ao *aiming point* (ponto de referência em que se daria o contacto com a pista, caso se mantivesse esta ladeira até ao fim). Ao atingir a altitude predefinida para realizar o arredondar, a aeronave suavemente aumenta a atitude de nariz em cima, para diminuir a velocidade de descida, transitando para uma descida gradual até ao ponto de tocar na pista, o *touchdown point* (Towards Autonomous Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicle

Landing: A Vision-Aided Inertial Navigation under Sensor Reconfiguration Scenario, 2008).

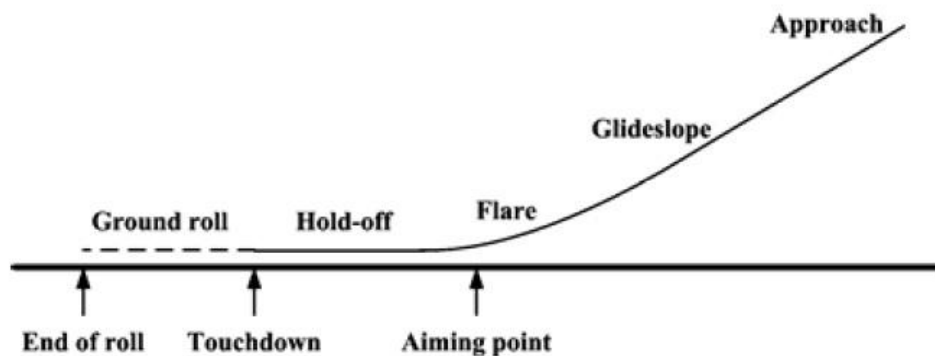


Figura 2-5 - Fases da aterragem típica de uma aeronave de asa fixa. (Extraído de (Towards Autonomous Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicle Landing: A Vision-Aided Inertial Navigation under Sensor Reconfiguration Scenario, 2008), Fig. 1).

Relativamente a requisitos de navegação para a realização de aproximações e aterragens automáticas com UAV, não foi encontrada literatura que os abordasse de forma concreta.

2.3.1 Aterragens automáticas das plataformas do CIAFA

O CIAFA (Centro de Investigação da Academia da Força Aérea) desde a sua criação, em 2011, tem estado envolvido no Projeto de Investigação e Tecnologia em Veículos Aéreos Não Tripulados ou PITVANT. Nesse âmbito, têm sido desenvolvidas diversas plataformas não tripuladas de classe I (UAV com massa inferior a 150 Kg, de acordo com a JAPCC em (Joint Air Power Competence Centre, 2010)), contribuindo para o *know-how* e experiência da Academia da Força Aérea neste tipo de veículos aéreos (Força Aérea Portuguesa, 2014).



Figura 2-6 - Plataforma Alfa-Extended do CIAFA. (retirado de (Força Aérea Portuguesa, 2014))

Estas plataformas levam a bordo o piloto-automático *Piccolo* da *Cloud Cap* que possui capacidade para navegar com recurso ao sistema GPS, contendo também sensores inerciais (giroscópios e acelerómetros) e barométricos (para leitura da altitude barométrica e da velocidade do ar indicada). Este equipamento, para além de ser compatível com diversos periféricos (*transponders*, magnetómetros, *Iridium*

SatComm, Laser-Altímetros, sistemas DGPS, entre outros), está também preparado para a realização de aterragens automáticas. Para tal, o *Piccolo* necessita que um Laser-Altímetro ou o sistema DGPS (ou ambos) estejam instalados na plataforma e corretamente configurados. (UTC Aerospace Systems, 2014)

Atualmente o CIAFA tem capacidade para realizar dois tipos de aterragens com as suas plataformas: a aterragem manual (realizada pelo piloto de segurança presente no local) e a aterragem automática por DGPS.

2.3.1.1 DGPS

O sistema DGPS utilizado nas plataformas do CIAFA é composto por recetor GPS *NovAtel* e respetiva antena na estação no solo (*ground station*), e por um recetor *NovAtel* e a antena instalada na aeronave. A antena do recetor da *ground station* é colocada numa posição fixa cujas coordenadas corretas são conhecidas e, a partir das medições de posição realizadas pelo recetor, são geradas as correções DGPS. Estas correções são então transmitidas pela *ground station* para o *Piccolo* instalado na aeronave através do *link* de dados via rádio. Na plataforma, o recetor GPS da *NovAtel* determina a posição da aeronave e, uma vez que está conectado ao *Piccolo*, transmite-lhe esta informação. Desta forma o *Piccolo*, a partir da posição determinada pelo recetor e das correções DGPS transmitidas pela *ground station*, consegue determinar a sua posição com uma exatidão anunciada de 2cm no plano horizontal e 4cm em termos de altitude (Underwood, et al., 2010).

Para a realização de uma aterragem automática utilizando este sistema, define-se no *Piccolo Command Center* (software utilizado na *ground station* para controlo do voo do UAV) o ponto de tocar desejado e a direção em que se pretende realizar a aterragem. Seguidamente é escolhido o ponto de entrada no circuito da aterragem automática (*Autoland waypoint*), sendo este o ponto para o qual a aeronave se dirige quando se pretende aterrar. Após o envio da ordem de aterrar, todo o processo é feito pelo *Piccolo* de forma automática (Vaglianti, et al., 2010).

No entanto, em testes realizados numa dissertação de mestrado com vista à validação do sistema DGPS, foi verificado um erro altimétrico na ordem dos 75cm (ver Figura 2-7). Embora verificando-se que o DGPS superava o GPS *stand-alone* incorporado no *Piccolo*, recomendou-se que a realização de aterragens automáticas

fosse limitado em determinadas situações, dada a pequena dimensão das plataformas operadas pelo CIAFA (Marques, 2014).

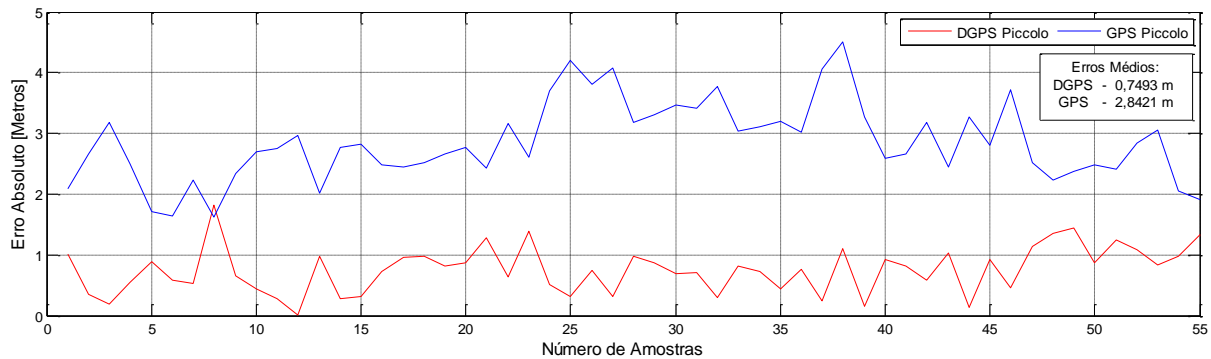


Figura 2-7 - Erro absoluto obtido nos testes realizados com os sistemas DGPS e GPS do Piccolo. (Extraído de (Marques, 2014), "Gráfico 18")

2.3.2 Outros sistemas de aterragem automática para UAV

Para além da tecnologia utilizada pelo CIAFA para a realização de aterragens automáticas, existem atualmente outras alternativas disponíveis no mercado. Estas podem ser divididas em três grupos: baseadas em Laser, baseadas em Radar e baseadas em sistemas eletro-óticos.

O OPATS (*Object Position And Tracking System*) é um sistema baseado na tecnologia Laser, e funciona através da constante medição da posição da aeronave pelo equipamento instalado no solo. Este sistema é constituído por dois componentes: o refletor (que é instalado no UAV) e o sensor/emissor Laser (instalado no solo). É emitido um feixe Laser na direção do UAV e, através da sua reflexão, o sistema mede a posição da aeronave em relação à ladeira ideal, enviando as correções necessárias (a uma frequência de 25 Hz) para que a mesma possa realizar uma aterragem de forma automática e segura. Assim, este sistema constitui uma solução com uma boa relação custo-benefício, de baixa complexidade e de difícil deteção, que minimiza o equipamento necessário a bordo do UAV (apenas o refletor). No entanto, e ao ter como base a utilização de Laser, a aterragem em más condições de visibilidade (nevoeiro ou chuva intensa) poderá estar condicionada (RUAG Aviation).



Figura 2-8 - O sistema OPATS composto por todo o equipamento instalado no solo (esquerda) e pelo refletor instalado no UAV (direita). (Extraído de (RUAG Aviation), "OPATS system" e "UAV equipment")

O TALS, ou *Tactical Automatic Landing System*, é um sistema baseado em radar desenhado para operar em terra e em espaços curtos, tanto de dia como de noite, independentemente das condições atmosféricas. Este sistema, com o mesmo princípio de funcionamento que o OPATS, é composto por dois elementos: o *transponder*, equipamento que vai a bordo do UAV e que «responde» às interrogações do equipamento do solo, e o sistema de seguimento no solo que deteta e segue o *transponder*. O TALS, embora com um envelope de operação superior ao do OPATS (em termos de visibilidade), é um sistema mais facilmente detetável e consome mais recursos a bordo do UAV (o *transponder* pesa cerca de 1,4 Kg e consome energia durante o seu funcionamento) (Sierra Nevada Corporation).



Figura 2-9 - O sistema TALS composto pelo transponder e a respetiva antena (esquerda) e o equipamento de seguimento no solo (direita). (Extraído de (Sierra Nevada Corporation), "Airborne Transponder Subsystem" e "Portable Ground-based Unit")

O *Intelligent Landing System* tem por base o uso de um sistema eletro-ótico (que incorpora uma câmara rotativa) associado a algoritmos de processamento de imagem para localizar a pista. O sistema é capaz de distinguir a pista de estradas, *taxiways* e outros pavimentos similares e, a partir de um algoritmo de localização, converte a informação visual em informação de posicionamento. Cruzando os dados

obtidos pelo sistema eletro-ótico (localização da pista, o erro no rumo relativo e rota desejada para a aterragem) com a informação GPS e a informação aeronáutica introduzida no UAV, este consegue definir o circuito ideal de aproximação e a respetiva ladeira ideal para a aterragem. Assim, o UAV consegue realizar a aterragem de forma autónoma, ou seja, sem a necessidade de utilizar equipamento exterior ao existente no UAV (Williams, et al., 2012). No entanto, a sua utilização poderá estar limitada em condições de má visibilidade.



Figura 2-10 - Solução do 'Intelligent Landing System' para a posição da soleira da pista 27 a partir de um sensor eletro-ótico. (Extraído de (Williams, et al., 2012), "Fig. 26")

2.4 Bibliografia

Airbus Industrie. 2001. *Getting To Grips With Category II And III Operations.* Blagnac : s.n., 2001.

ANASTASIA Consortium. 2009. ANASTASIA. [Online] 2009. [Cited: novembro 12, 2014.] http://www.anastasia-fp6.org/anastasia/anastasia_index.htm.

—. **2006.** High Accuracy and Integrity Navigation: Category-II/III Precision Approaches & ASMGCS. ANASTASIA. [Online] maio 9, 2006. [Cited: novembro 12, 2014.] http://www.anastasia-fp6.org/documentation/presentations/Presentations_Docs/ENCI_MP_050509-1_GBAS-ASMGCS-final.pdf.

CASA. 2012. Autoland. *The AOC Handbook.* 2012, Vol. 2.

EASA. 2003. *CS-AWO: Certification Specifications for All Weather Operations.* 2003.

Edwards, Roger. CHAPTER 6: Precision Approach Systems. *ELEC4504 Avionics Systems.*

Eurocontrol. 2013. *Challenges of Growth 2013*. 2013. Vol. Task 4: European Air Traffic in 2035.

Federal Geodetic Control Subcommittee (FGCS). GPS & Selective Availability Q&A. [Online] [Cited: novembro 12, 2014.] http://www.josto.net/sa/GPS_SA_Event_QAs.pdf.

Força Aérea Portuguesa. 2014. PITVANT | Academia da Força Aérea. *Web Site da Academia da Força Aérea*. [Online] FAP - DCSI, 2014. [Cited: novembro 14, 2014.] <http://www.emfa.pt/www/po/unidades/subPagina-10D00-019.005.003.004-pitvant>.

—. 2014. SEADN visita Academia da Força Aérea. *Força Aérea Portuguesa*. [Online] FAP, março 12, 2014. [Cited: fevereiro 10, 2015.] <http://www.emfa.pt/www/noticia-512>.

ICAO. 2010. *Annex 6: Operation of Aircraft - Part I*. 9^a. Montréal : s.n., 2010.

—. 2013. *Doc 9365, Manual of All-Weather Operations*. Terceira. Montréal : s.n., 2013.

Joint Air Power Competence Centre. 2010. *JAPCC Strategic Concept of Employment for UAS in NATO*. Kalkar (Alemanha) : s.n., 2010.

Lipp, Andreas. 2010. Ground Based Augmentation Systems (GBAS) Introduction - Technical and Operational Overview. *Website da ICAO*. [Online] março 18, 2010. [Cited: novembro 12, 2014.] <http://www.icao.int/EURNAT/Other%20Meetings%20Seminars%20and%20Workshops/GBAS/GBAS%20Presentations/GBAS%20WS-180310-IntroTech.pdf>.

Marques, Pedro Gonçalo. 2014. *Validação de um sistema DGPS para navegação de UAV's do projeto PITVANT*. Sintra : Academia da Força Aérea, 2014.

Roke Manor Research Limited. 2011. Autoland UAVs: Vision for the Future. [Online] janeiro 7, 2011. [Cited: novembro 13, 2014.] <http://www.roke.co.uk/resources/white-papers/0371-Autoland-WP.pdf>.

RUAG Aviation. OPATS – The Laser-based Automatic Landing System for UAVs: Brochure. *RUAG: UAS Landing System - OPATS*. [Online] RUAG. [Cited: dezembro 14, 2014.] http://www.ruag.com/fileadmin/ruag/Self-Protection/PDF/broschueren/Brochure_OPATS_UAV_web.pdf.

—. OPATS – The Laser-based Automatic Landing System for UAVs: Fact Sheet. *RUAG: UAS Landing System - OPATS*. [Online] [Cited: dezembro 14, 2014.] http://www.ruag.com/fileadmin/ruag/Aviation/PDFs/FS_OPATS.pdf.

Sabatini, R. and Palmerini, G. B. 2008. *RTO-AG-160-V21 - Differential Global Positioning System (DGPS) for Flight Testing*. Cedex : North Atlantic Treaty Organisation, 2008. Vol. 21.

Sierra Nevada Corporation. TALS Product Sheet. *SNC - Sierra Nevada Corporation*. [Online] [Cited: dezembro 14, 2014.] <http://www.sncorp.com/pdfs/BusinessAreas/TALS%20Product%20Sheet.pdf>.

The Economic Importance of Air Travel In High-Amenity Rural Areas. **Rasker, Ray, et al. 2009.** Julho 2009, Journal of Rural Studies, Vol. 25, pp. 343-353.

Towards Autonomous Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicle Landing: A Vision-Aided Inertial Navigation under Sensor Reconfiguration Scenario. **Joo, Sungmoon, et al. 2008.** Seul : s.n., 2008. The International Federation of Automatic Control.

Underwood, Dan and Becker, Jon. 2010. *NovAtel Integration Guide*. Hood River : Cloud Cap Technology, 2010.

UTC Aerospace Systems. 2014. Cloud Cap Technology Piccolo II Data Sheet. [Online] janeiro 2014. [Cited: novembro 14, 2014.] <http://www.cloudcaptech.com/Sales%20and%20Marketing%20Documents/Piccolo%20II%20Data%20Sheet.pdf>.

Vaglianti, Bill, et al. 2010. *Piccolo User's Guide*. Hood River : Cloud Cap Technology, 2010.

Williams, Paul and Crump, Michael. 2012. *Intelligent Landing System for Landing UAVs at Unsurveyed Airfields*. s.l. : BAE Systems Australia, 2012.

Capítulo 3 - Laser-Altimetria

3.1 Noções de Altitudes Elipsoidal, Ortométrica e Absoluta

Ao contrário do constatado por Aristóteles nos anos 400 a.C., é atualmente notório que a Terra não é um corpo esférico perfeito, mas ligeiramente achatada nos polos (tal como previsto por Newton). Assim, a forma geométrica simples que modela superfície terrestre de forma mais fidedigna é um elipsoide oblato (Pestana, 2013) (Fraczek, 2003). Desde 1800 têm sido realizadas diversas medições com vista a determinar a forma e dimensões precisas do planeta, mas, devido à não homogeneidade do campo gravítico terrestre e a pequenas diferenças na precisão dos equipamentos utilizados, estas resultaram em pequenas variações no valor dos semieixos e do achatamento. Mais recentemente, e com base na informação recolhida por satélites, foi possível determinar elipsoides mais precisos do que os obtidos pelas medições à superfície, como são exemplos os utilizados nos sistemas de referência WGS72 e WGS84 (*World Geodetic System* 1972 e 1984 respetivamente) (Pestana, 2013).

Os sistemas GPS e DGPS utilizam o sistema de referência WGS84, ou seja, fornecem a posição do utilizador em relação ao elipsoide WGS84 e não em relação à superfície do planeta (United Nations Office for Outer Space Affairs) (Pestana, 2013). Assim, a altitude obtida através destes sistemas tem o nome de altitude elipsoidal (valor h da Figura 3-1, caso o utilizador esteja na superfície terrestre), e corresponde à distância vertical entre um determinado ponto e o elipsoide de referência (neste caso o WGS84). Embora o objetivo do elipsoide de referência fosse constituir uma boa aproximação do nível médio das águas do mar, tal não se verifica uma vez que a terra não é homogénea na sua constituição e a sua superfície é irregular (Fraczek, 2003).

O modelo que mais fielmente representa a superfície terrestre é o geoide, uma superfície “equipotencial gravítica correspondente ao nível médio dos oceanos” (Pestana, 2013). Existem vários modelos de geoide que permitem, a partir de um determinado elipsoide de referência, obter a ondulação do geoide para uma determinada zona do globo (o valor N na Figura 3-1). Desta forma, é possível realizar a transformação de altitudes elipsoidais em altitudes ortométricas (altitudes medidas em relação ao geoide ou nível médio das águas do mar, correspondendo ao valor H da Figura 3-1 caso o utilizador esteja à superfície terrestre). Para Portugal Continental,

o modelo de geóide em vigor é o 'GeodPT08' e permite obter a ondulação deste em relação ao elipsóide GRS80 (FCUL/DGT, 2014).

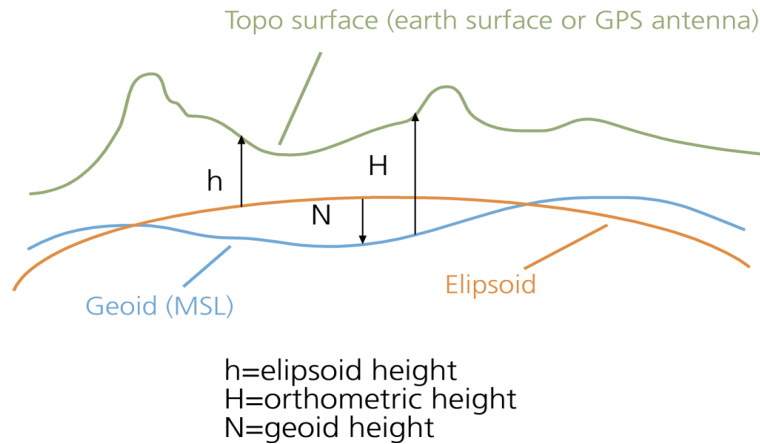


Figura 3-1 - Diferenças entre o elipsóide, geóide e elevação do terreno. (Extraído de (Fraczek, 2003))

No entanto, para a aviação geral, a altitude AMSL ou ortométrica não é obtida através da correção da altitude GPS, mas sim através do altímetro barométrico. Este instrumento, através da medição da pressão no local (originada pelo peso da coluna de ar imediatamente acima do instrumento), informa o utilizador de qual a sua altitude (distância vertical) em relação a uma determinada superfície de pressão. Esta pode ser seleccionada no instrumento, através da sua introdução na janela de Kollsman. Assim, se a superfície de pressão seleccionada coincidir com o nível médio das águas do mar (ocorre quando é introduzido o QNH na janela de Kollsman), a altitude medida pelo instrumento é uma altitude ortométrica (Oxford Aviation Training, 2009) (National Weather Service, 2002).

A altitude AGL ou absoluta corresponde à distância vertical entre a aeronave e o solo por baixo desta. Na aviação geral, esta altitude é frequentemente obtida a partir da leitura direta de sensores AGL tal como um Radar-Altímetro ou Laser-Altímetro (Schappert). A altitude AGL pode também ser obtida através da utilização de informação topográfica como um DEM ou DTM (Modelo de Elevação Digital ou Modelo de Terreno Digital), subtraindo à altitude ortométrica a elevação do terreno para uma determinada posição.

3.2 O Laser

A palavra Laser é um acrónimo formado a partir das iniciais de “Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation”, expressão que resume os principais processos envolvidos na emissão de um feixe Laser (Lee, et al.).

3.2.1 Constituição de um Laser

De uma forma simplificada, um Laser consiste numa câmara Laser (também denominada de cavidade ótica ressonante) que é composta por dois espelhos (um totalmente refletivo e outro parcialmente refletivo), uma fonte de energia e um meio ativo (responsável por amplificar a energia emitida pela fonte de energia), tal como ilustra a Figura 3-2.

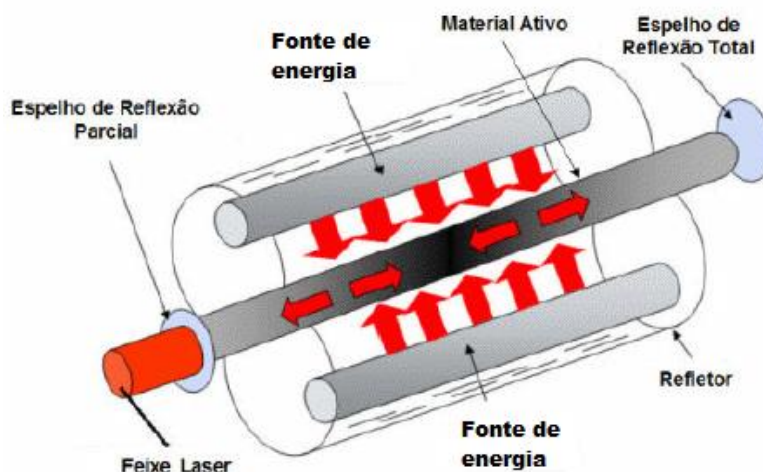


Figura 3-2 - Diagrama simples de uma cavidade ótica ressonante geradora de Laser. (Adaptado de (Leme, et al.), "Figura 2")

A câmara é altamente refletiva e contém o meio ativo no seu interior (que pode ser um material sólido, líquido ou gasoso). Este meio representa a fonte de elétrons necessária para produzir o feixe luminoso por emissão estimulada de radiação e define o comprimento de onda da radiação emitida. Enquanto meio ativo, podem ser utilizados materiais como corante (Lasers de estado líquido), dióxido de carbono, árgon, excimer (Lasers gasosos), rubi, alexandrite (Lasers de estado sólido), díodos (Lasers de estado sólido semicondutores), entre outros (Leme, et al.) (Allemann, et al., 2011).

3.2.2 Princípio de Funcionamento

Para que o feixe Laser seja gerado, é emitida energia sobre o material ativo de forma contínua ou intermitente, resultando num feixe Laser contínuo ou intermitente. Devido ao fenómeno denominado de 'inversão de população', o material, ao receber a radiação da fonte, amplifica-a e emite-a em todas as direções, principalmente no eixo da cavidade ressonante. Esta energia é refletida múltiplas vezes no interior da câmara, sendo amplificada a cada passagem pelo meio ativo devido ao processo de emissão estimulada de radiação. Ao atingir o espelho parcialmente refletivo, parte da

energia atravessa-o (formando o feixe Laser) enquanto que a restante é refletida e realiza o trajeto inverso, resultando num aumento da intensidade no interior da cavidade (Leme, et al.).

3.2.3 Caraterísticas da Luz Laser

A luz Laser tem três principais características que a distinguem da proveniente de outras fontes luminosas: é monocromática, coerente e colimada, tal como ilustrado na Figura 3-3.


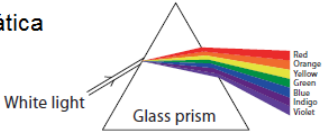

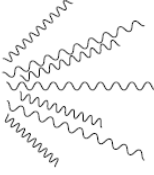
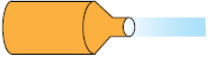
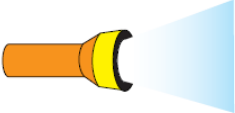
Luz Laser	Luz Branca (e.g. lanterna)
<p>Monocromática</p> 	<p>Policromática</p> 
<p>Coerente</p> 	<p>Não Coerente</p> 
<p>Colimada</p> 	<p>Divergente</p> 

Figura 3-3 - Diferenças entre a luz Laser e a luz branca. (Adaptado de (Allemann, et al., 2011), "Fig. 3")

Assim, sendo monocromática, a luz Laser é composta por um único comprimento de onda bem definido ou um espectro muito estreito de comprimentos de onda (em contraste com a luz solar que é composta por um largo espectro de comprimentos de onda). Ao ser coerente, a luz Laser encontra-se em fase tanto em relação ao tempo como ao espaço. Esta característica é assegurada pelo processo de emissão estimulada de radiação, que só permite que luz que tenha a mesma fase e direção seja emitida. Por fim, ao ser colimada, as ondas eletromagnéticas que compõem o feixe Laser são paralelas entre si, pelo que, virtualmente, o diâmetro deste é sempre constante (não há divergência) (Allemann, et al., 2011). No entanto, devido ao fenómeno de difração e considerando o feixe Laser um feixe de Gauss (modo transversal simples ou TEM₀₀, tal como ilustrado na Figura 3-4), existe sempre divergência. Assim, é possível prever as variações do diâmetro do feixe e da

divergência com a distância, uma vez que estas estão em função do raio da cintura do feixe (Melles Griot).

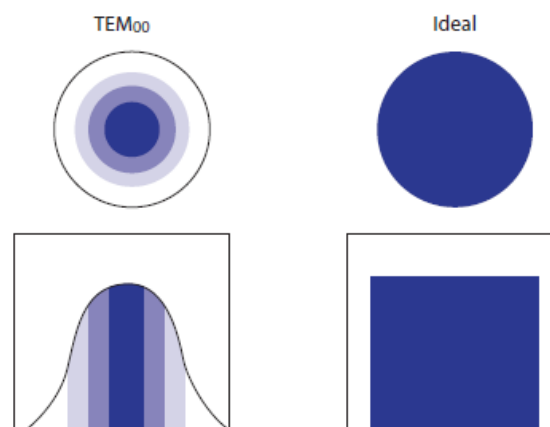


Figura 3-4 - Perfil de um feixe de Gauss (à esquerda) e de um feixe ideal em que toda a energia está contida numa área bem definida (à direita). (Adaptado de (Allemann, et al., 2011), "Fig. 7")

3.2.4 Classificação dos Lasers em função da sua Potência

A nível de potência, os Lasers são muito versáteis tendo, por isso, diversas utilidades que vão desde o seu uso em leitores de códigos de barras nos supermercados (Lasers gasosos de baixa potência), até ao seu uso em experiências relacionadas com a fusão termonuclear, cujos pulsos podem atingir potências na ordem dos 10^{14} W (Lee, et al.). No entanto, a radiação Laser, caso não seja utilizada com as devidas precauções, pode ter efeitos prejudiciais à saúde. A exposição da pele à mesma pode originar queimaduras (radiações na zona do visível e infravermelha com tempos de exposição superiores a 10 microssegundos) ou até mesmo levar a alterações celulares potencialmente cancerígenas (radiações na zona do ultravioleta com tempos de exposição superiores a 10 segundos). Podem também ocorrer danos oculares quando expostos a radiação entre as gamas infravermelhas e ultravioleta do espectro eletromagnético (myVMC, 2009).

Surgiu assim a necessidade de classificar os equipamentos Laser consoante o risco que apresentam para o ser humano. De acordo com o padrão da IEC (*International Electrotechnical Commission*) IEC60825-1, os Lasers podem ser classificados tal como mostra a seguinte tabela.

Tabela 3-1 - Classificação dos lasers de acordo com o padrão IEC60825-1. Informação retirada de (Rockwell Laser Industries) e (Sensor Central).

Classificação	Descrição
Classe 1	Lasers seguros para operação nas condições previstas.
Classe 1M	Lasers com comprimento de onda compreendido entre 302.5 e 4000 nm, seguros para operação nas condições previstas exceto quando utilizados com óticas auxiliares (e.g. binóculos).
Classe 2	Lasers que emitem radiação visível com comprimentos de onda compreendidos entre 400 e 700 nm, seguros devido ao 'reflexo de fechar os olhos' que limita a exposição para valores inferiores a 0,25 segundos.
Classe 2M	Lasers que emitem radiação visível com comprimentos de onda compreendidos entre 400 e 700 nm, seguros devido ao 'reflexo de fechar os olhos' exceto quando utilizados com óticas auxiliares.
Classe 3R	Lasers com comprimento de onda compreendido entre 302.5 e 10 ⁶ nm, potencialmente perigosos (embora com um baixo risco de danos), mas cujo risco é inferior aos lasers da classe 3B.
Classe 3B	Lasers perigosos quando há exposição direta dos olhos à sua radiação, mas cujas reflexões difusas não são perigosas.
Classe 4	Lasers cujas reflexões difusas são perigosas. Podem causar lesões na pele e/ou incendiar materiais.

3.3 O Laser-Altímetro

O Laser-Altímetro é um sensor de altitude capaz de fornecer ao utilizador a distância a que este se encontra do solo, através da utilização de um feixe Laser.

Esta tecnologia, também denominada de LIDAR (*Light Detection And Ranging*) (EASA; European Commission, 2010), começou por ser utilizada nas missões Apollo, no início dos anos 70, para observações a partir do espaço. Grandes progressos têm sido feitos a nível desta tecnologia, e os Laser-Altímetros tornaram-se uma ferramenta essencial para os programas espaciais (Mattei, et al., 2003).

Hoje, graças à evolução tecnológica, foi possível desenvolver Laser-Altímetros mais pequenos, mais leves e com menos potência (e conseqüente menor consumo de energia) do que os utilizados nas primeiras missões espaciais, adequados para serem operados em UAV (Mattei, et al., 2003). As aplicações da tecnologia LIDAR

vão, atualmente, desde o seu uso para simples medições de distância (entre veículos e a superfície terrestre e entre dois veículos) até ao mapeamento da superfície terrestre ou de outros planetas (através da medição sucessiva de vários pontos à superfície por parte de um satélite ou aeronave). Esta tecnologia pode também ser utilizada para observações e medições no planeta Terra, através da utilização de LIDAR Doppler (utilizado para medir a temperatura e/ou velocidade do vento ao longo do feixe) e através do uso de LIDAR diferencial de absorção (utilizado para medir a refletividade da superfície ou até a concentração de dióxido de carbono na atmosfera) (EASA; European Commission, 2010) (Koch, et al., 2004).

3.3.1 Princípio de Funcionamento

Os equipamentos LIDAR são constituídos essencialmente por três elementos: o transmissor, o recetor e os sistemas de suporte. O transmissor, o elemento constituído pelo emissor Laser, é a unidade responsável por emitir o feixe luminoso em direção à superfície. O recetor, composto pelo detetor e pelas respetivas lentes, tem como função receber as reflexões do feixe da superfície. Por fim, os sistemas de suporte são compostos pela alimentação do sistema e pelos equipamentos de teste, controlo e processamento (EASA; European Commission, 2010).

Para a determinação de distâncias, o Laser-Altímetro emite periodicamente um feixe Laser pulsado que passa pelas lentes do transmissor em direção à superfície. Este ao atingi-la, é refletido, e parte dele é captada pelo recetor. A distância entre o Laser-Altímetro e a superfície é obtida através da medição do tempo decorrido desde a emissão do pulso luminoso e a sua receção (princípio *Time Of Flight*), tendo em conta a velocidade da luz (RIEGL - Laser Measurement Systems). O diagrama presente na figura seguinte ilustra a constituição e o funcionamento básico de um Laser-Altímetro.

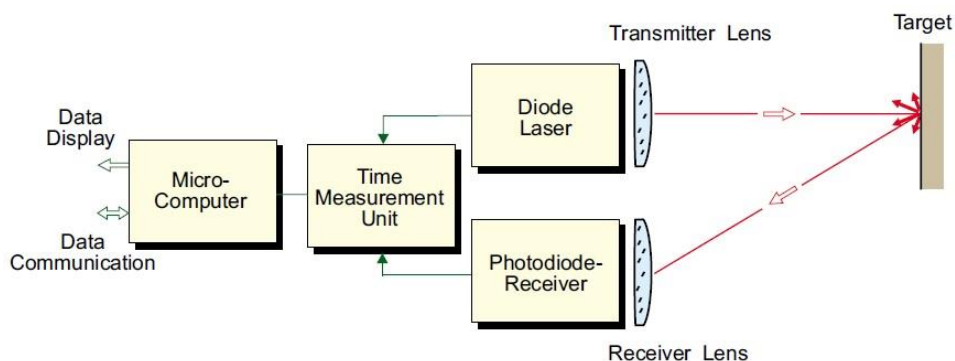


Figura 3-5 - Diagrama exemplificativo da constituição e funcionamento de um Laser-Altímetro. (Extraído de (RIEGL - Laser Measurement Systems))

3.3.2 O Princípio TOF (*Time of Flight*)

O princípio TOF (ou *Time of Flight*) é um princípio básico que permite realizar medições de distâncias com recurso a ondas eletromagnéticas pulsadas. Tal pode ser feito com recurso a um feixe Laser pulsado, como num Laser-Altímetro, ou a ondas rádio pulsadas, como num Radar-Altímetro.

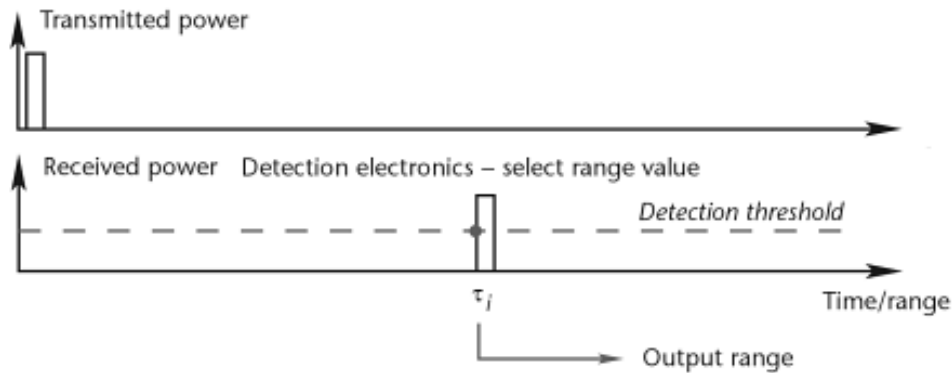


Figura 3-6 - Determinação da distância através do princípio TOF com um pulso laser perfeito e uma superfície refletiva uniforme. (Adaptado de (Adams, et al., 2012), "Figure 2.16")

Quando um pulso de radiação é emitido, é iniciada a contagem do tempo pela unidade de medição de tempos no interior do equipamento. Este pulso, ao atingir a superfície, é refletido e a sua reflexão é detetada pelo sensor. Simultaneamente, a unidade de medição de tempos para a contagem do tempo, obtendo assim o 'tempo de voo', ou seja, o tempo que o pulso demorou a percorrer a distância de ida e volta até ao recetor (Bruzzi, et al., 2012). Desta forma, considerando a velocidade da luz (c) constante para um determinado meio (cerca de 2.99×10^8 m/s no vácuo) (Penzes) (Mackay, 2005) e pela definição de velocidade é possível obter a equação eq. (1) que permite determinar a distância percorrida pelo pulso (d) num determinado intervalo de tempo (Δt).

$$v = \frac{d}{\Delta t} \Leftrightarrow c = \frac{d}{\Delta t} \Leftrightarrow d = c \cdot \Delta t \quad (1)$$

No entanto, uma vez que o pulso de radiação realiza um percurso de ida e volta, a distância (R) entre o equipamento e a superfície (metade da distância total percorrida pelo pulso Laser) é determinada com a equação eq. (2) (Bruzzi, et al., 2012).

$$R = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (2)$$

3.3.3 A Refletividade

A eficácia do Laser-Altímetro está também condicionada pelo coeficiente de reflexão da superfície em que o feixe incide. Torna-se assim igualmente importante estudar as propriedades refletivas de alguns tipos de terrenos que compõem a superfície terrestre.

Quando uma onda eletromagnética atinge a superfície terrestre, podem ocorrer três fenômenos: reflexão, absorção e transmissão. Por outras palavras, a soma da energia refletida, absorvida e transmitida é sempre igual ao total de energia incidente. Para o caso da energia que sofre reflexão, fenômeno que é relevante para o estudo do funcionamento do Laser-Altímetro, existem dois extremos: a reflexão especular e a reflexão difusa (Mackay, 2005) tal como ilustra a Figura 3-7. A reflexão especular é caracterizada pelo facto de toda a radiação incidente ser refletida numa única direção, cujo ângulo de reflexão iguala o ângulo de incidência. Este tipo de fenómeno ocorre em superfícies muito polidas, tal como é o exemplo de um espelho plano com propriedades de um refletor perfeito. Por outro lado, a reflexão difusa é aquela em que a radiação refletida é igual em todas as direções, ou seja, a superfície aparenta ser igualmente brilhante de todas as direções (no caso da radiação se encontrar no espectro da luz visível) (Nayar, et al., 2009). Porém, é importante realçar que a maior parte das superfícies existentes refletem a radiação de forma intermédia: a radiação sofre um tipo de reflexão que se encaixa entre a reflexão especular ideal e a reflexão difusa ideal (Mackay, 2005).

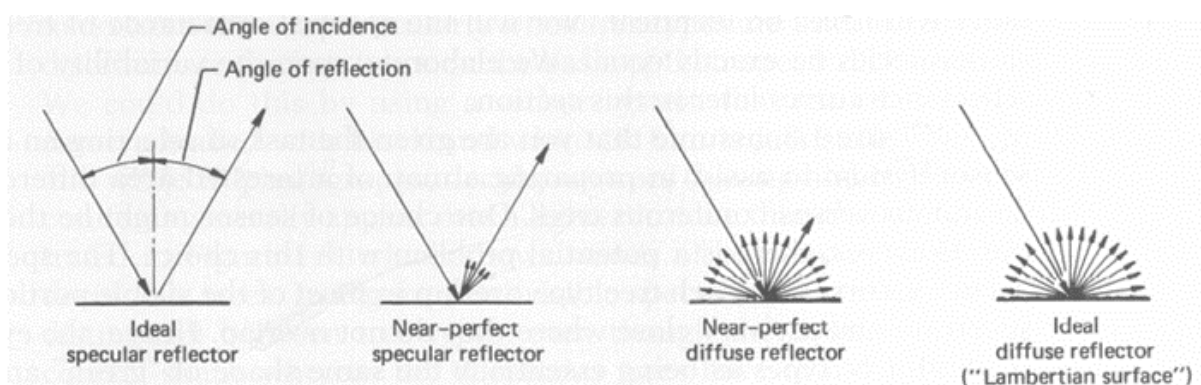


Figura 3-7 - A reflexão especular e difusa. (Extraído de (Mackay, 2005), "Figure 7")

Contudo, a superfície terrestre não é toda ela plana e livre de obstáculos: contém elementos naturais e humanos (como casas, árvores, vegetação, entre outros) que poderão causar erros nas leituras realizadas pelo Laser-Altímetro. Um tipo de erro muito comum nestas situações são aqueles que ocorrem devido a reflexões

prematuras do feixe (em ramos de árvores, folhagem, arbustos, entre outros) tal como ilustra a Figura 3-8. Embora nos primeiros Laser-Altímetros apenas fosse tida em conta a primeira reflexão do pulso luminoso, os mais recentes apresentam a capacidade de medir as várias reflexões de cada pulso, em que as últimas têm maior probabilidade de ser do solo. Esta capacidade é especialmente importante para a realização de mapeamento topográfico do terreno (Harding, 2000).

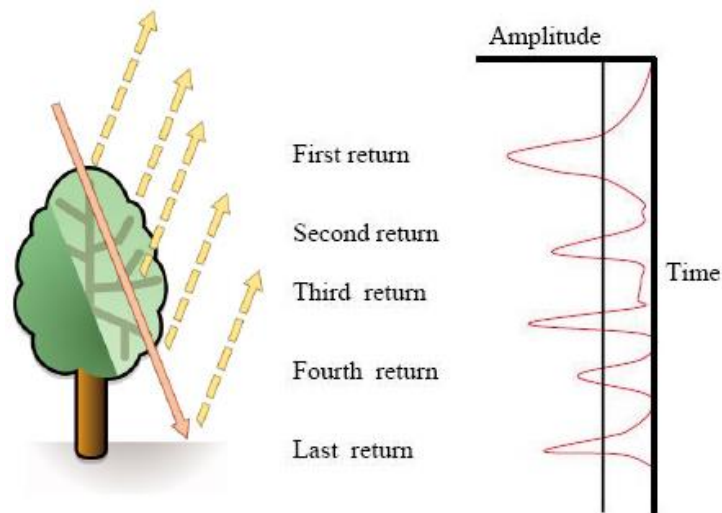


Figura 3-8 - Múltiplas reflexões ocorridas em vegetação. (Adaptado de (Lohani, 2008) e (ESRI))

Um outro aspeto a considerar no estudo da reflexão de energia eletromagnética é a variação do coeficiente de reflexão com o comprimento de onda. A mesma superfície reflete com intensidades diferentes, diferentes comprimentos de onda, dependendo da sua composição mineral, da humidade do solo, do seu conteúdo orgânico e textura (ver Figura 3-9 e Figura 3-10) (Department of Geography - University of Calgary).

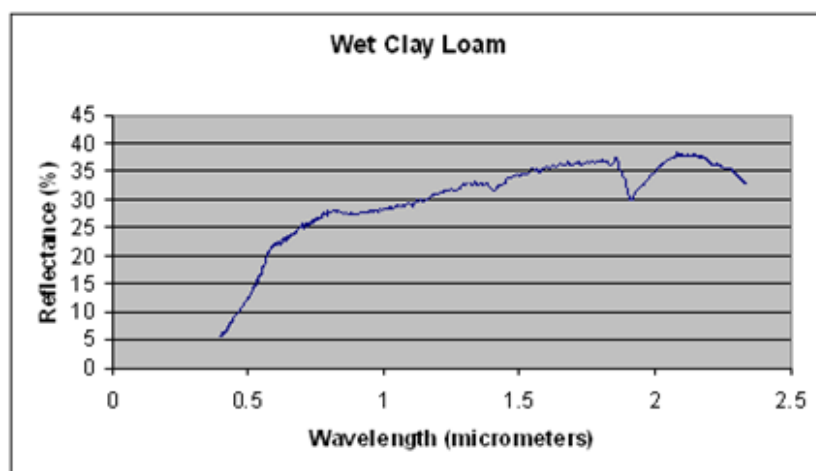


Figura 3-9 - Refletividade do solo argiloso húmido em função do comprimento de onda. (Extraído de (Mackay, 2005), "Figure 11")

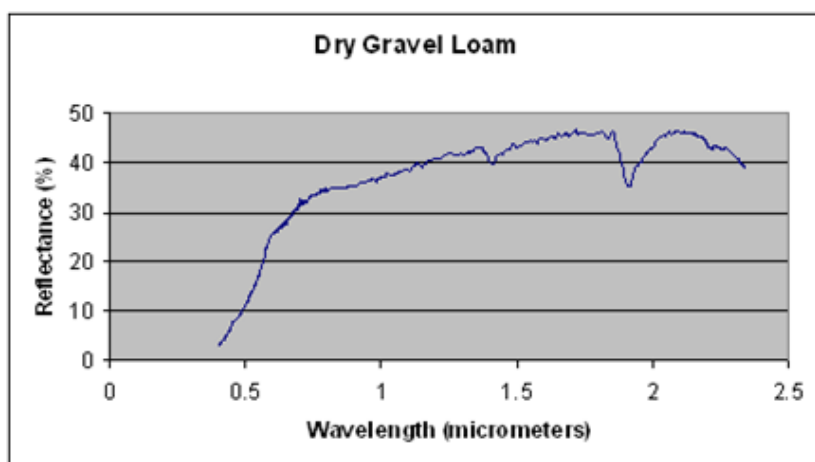


Figura 3-10 - Refletividade do solo composto por gravilha seca em função do comprimento de onda. (Extraído de (Mackay, 2005), "Figure 12")

As superfícies cobertas por vegetação são muito refletoras na gama de infravermelhos próximos (NIR) do espectro eletromagnético (gama de radiação compreendida entre 0,78 e os 2,5 μm (Workman, 2014)). Tal acontece devido à existência de uma estrutura nas folhas, o mesófilo, que difunde muita radiação NIR (Mackay, 2005).

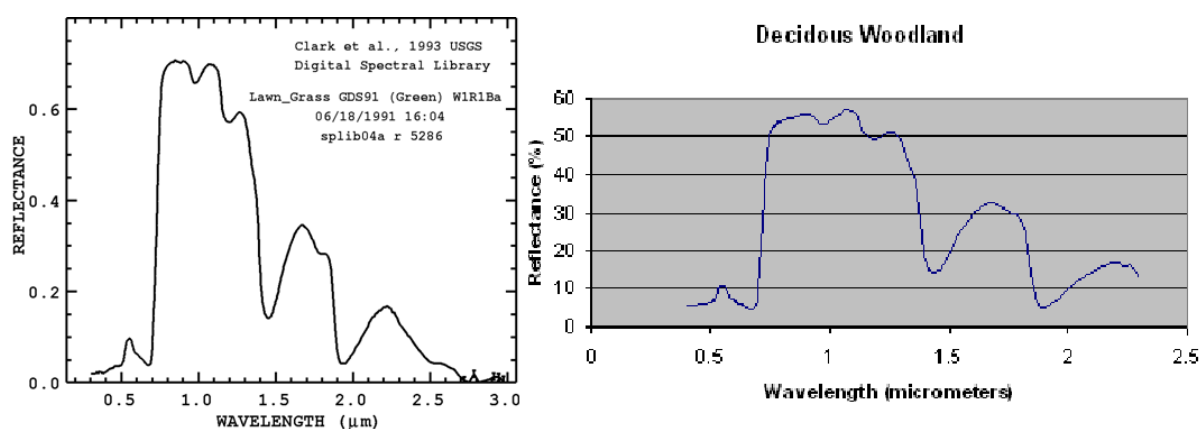


Figura 3-11 - Refletividade de um campo relvado (esquerda) e de um arvoredo no Outono (direita) em função do comprimento de onda. (Adaptado de (Mackay, 2005), "Figure 9; Figure 10")

As superfícies cobertas por neve (Figura 3-12) são muito refletivas para pequenos comprimentos de onda, mas, com o aumento deste, a refletividade diminui. Em contraste, as superfícies cobertas por água limpa (Figura 3-13) são muito pouco refletivas, sendo que o seu máximo de reflexão ocorre para comprimentos de onda correspondentes à radiação visível de cor azul (Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing (CRISP), 2001). Desta forma, torna-se difícil obter leituras válidas de altitude sobre água com um Laser-Altímetro, principalmente na presença de radiação solar em determinados ângulos e intensidades (Beamish, et al., 2010).

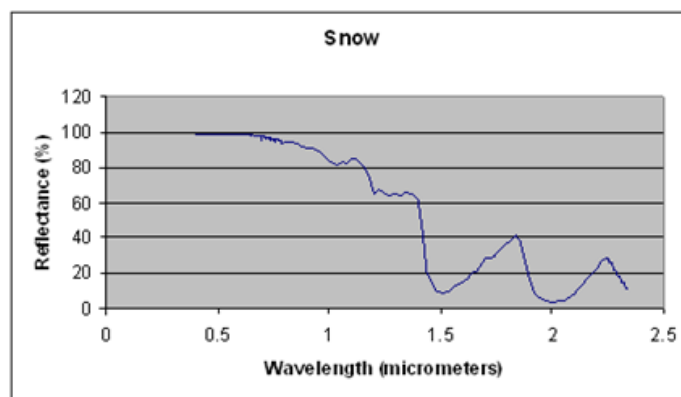


Figura 3-12 - Refletividade da neve em função do comprimento de onda. (Extraído de (Mackay, 2005), "Figure 14")

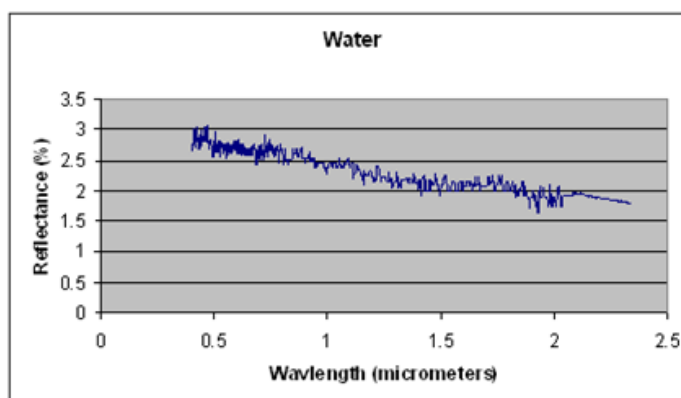


Figura 3-13 - Refletividade da água em função do comprimento de onda. (Extraído de (Mackay, 2005), "Figure 13")

3.3.4 Vantagens e Limitações do Laser-Altímetro

Tal como já referido anteriormente, para determinar a altitude AGL de uma determinada aeronave podem ser utilizados tanto um Laser-Altímetro como um Radar-Altímetro. No entanto, e embora ambos utilizem ondas eletromagnéticas para cumprir a sua função, existem algumas diferenças entre estes dois instrumentos.

Comparando estes equipamentos, o Laser-Altímetro tem a vantagem de ter uma *footprint* mais reduzida devido ao seu feixe estreito (ver Figura 3-14) o que, a altitudes mais elevadas, evita a obtenção de falsas medições (deteção de obstáculos que não estão diretamente sobre a aeronave). Os Laser-Altímetros são também, em média, mais pequenos e apenas necessitam de uma amostragem para obter uma medição. Tal não acontece com os Radar-Altímetros pois, tendo estes um SNR (*Signal to Noise Ratio*) inferior ao da tecnologia Laser, necessitam de realizar a média de um grande número de amostragens para obter uma medição válida (Mattei, et al., 2003). No entanto, o Laser-Altímetro, durante a operação diurna, está sujeito ao ruído proveniente da radiação solar que poderá diminuir o seu SNR (Liew, 2001).

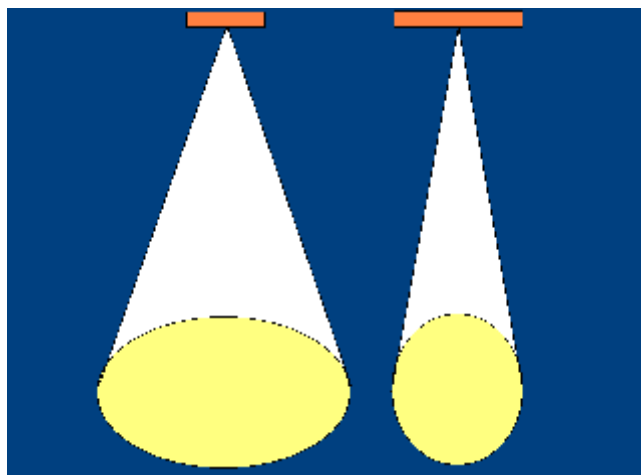


Figura 3-14 - Representação da footprint de um Radar (esquerda) e de um Laser (direita). (Adaptada de (Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing (CRISP), 2001))

Por outro lado, tendo o Laser um comprimento de onda mais pequeno, faz com que este consiga detetar objetos mais reduzidos (incluído partículas, aerossóis e a própria turbulência atmosférica) o que, para este tipo de função, é uma desvantagem. Assim, o uso do Laser-Altímetro fica limitado a dias de boa visibilidade e em que as nuvens não constituam obstáculo pois o feixe não as consegue penetrar. Já o Radar-Altímetro consegue operar em quaisquer condições atmosféricas sem sofrer grandes atenuações (Mattei, et al., 2003).

3.3.5 O Sensor AGL

Os sensores AGL da *Latitude Engineering* são Laser-Altímetros desenhados para UAV com o objetivo de facilitar a aterragem autónoma e automática dos mesmos. O modelo adquirido pelo CIAFA é designado por Sensor AGL e caracteriza-se por ser um Laser-Altímetro de pequenas dimensões, baixo peso e com interface de alimentação e comunicações integrada para fácil utilização em UAV. O *Piccolo*, piloto-automático utilizado nas aeronaves do CIAFA, está preparado para operar com este sensor na realização de aterragens automáticas, mediante a obtenção da respetiva licença/código à *Cloud Cap*.

3.3.5.1 Características do sensor

O Sensor AGL (ver Figura 3-15) tem como dimensões 10,59cm x 11,31cm x 4,5cm, uma massa de 255g e é fabricado com plástico ABS. Contém dois orifícios, um para o emissor e outro para o recetor Laser, e um conector DB9 através do qual é feita a alimentação e comunicação com o sensor. A nível do seu funcionamento, este instrumento tem uma taxa de leitura de 1Hz, uma resolução de 10cm (leituras de alta

resolução) ou de 1m (leituras de baixa resolução) e um alcance útil de 400m (tendo já em conta os diferentes tipos de terreno, as suas irregularidades e o movimento da aeronave). Contudo, o alcance estático deste equipamento é de 1000m para um alvo genérico e 2000m para um alvo refletivo, tendo uma exatidão de +/-30cm (leituras de alta resolução) ou +/-1m (leituras de baixa resolução). A nível de alimentação, o Sensor AGL funciona com corrente contínua entre 7V e 36V, tendo um consumo inferior a 1W a 12V. O seu emissor Laser é de classe 1M, tem um comprimento de onda de 905nm e o seu feixe tem uma divergência de 3mrad. Desta forma, como é possível observar na figura seguinte, a 200m de altitude, a *footprint* do feixe tem cerca de 0,6m de diâmetro no solo.



Figura 3-15 - O Sensor AGL da Latitude Engineering. (Extraído de (Latitude Engineering, 2014))

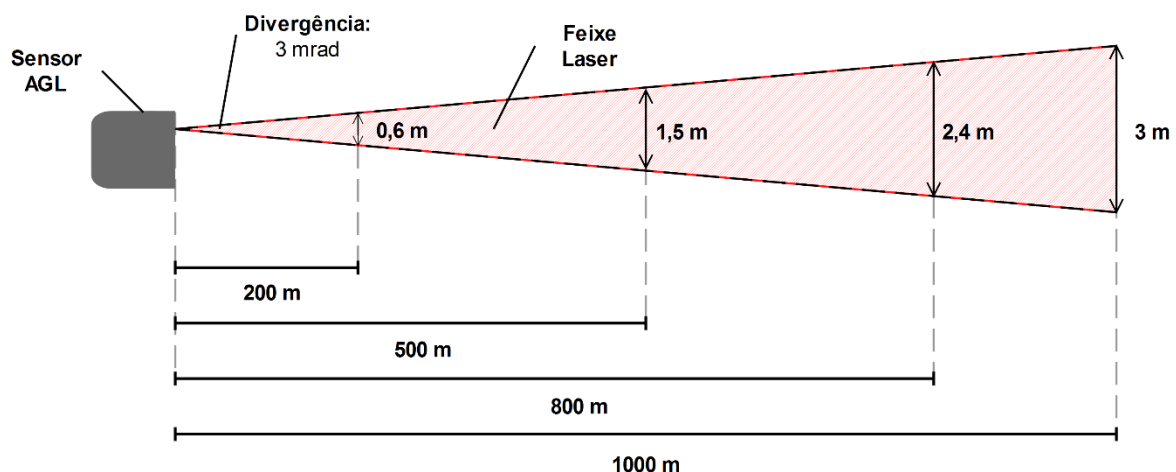


Figura 3-16 - Diagrama ilustrativo do diâmetro da footprint do Sensor AGL em função da distância.

Para a sua correta operação, o sensor deve ser instalado na aeronave com as óticas perpendiculares ao eixo vertical da mesma, apontadas para baixo. A fuselagem da aeronave não deve obstruir as lentes, sendo recomendada uma abertura com pelo menos 5 mm em torno destas e deixando livre um cone com +/- 45° a partir das mesmas.

A nível do seu funcionamento com o *Piccolo*, o Sensor AGL atua apenas como um sistema auxiliar na execução de aterragens automáticas. Por outras palavras, a altitude AGL determinada pelo sensor apenas é utilizada na perna final do circuito de aterragem. Mais concretamente, o *Piccolo* deteta se há um Laser-Altímetro conectado e, no caso de a informação enviada por este corresponder a boas medições e de a plataforma se encontrar na perna final do circuito, o piloto-automático irá utilizá-las

como referência altimétrica e realizar a aterragem automática. Se ambos os sistemas DGPS e Sensor AGL se encontrarem instalados na plataforma, o sistema DGPS será o que é utilizado em todo o voo, sendo que durante a perna final do circuito de uma aterragem automática, serão utilizadas as medições do Laser-Altímetro em vez da altitude do DGPS. É importante salientar que as leituras do Sensor AGL passam pelo filtro de Kalman do *Piccolo*, pelo que a altitude AGL obtida através deste corresponde à estimativa do filtro de *Kalman* e não às leituras diretas do sensor.

3.3.5.2 A Interface Elétrica

Este equipamento tem, tal como referido anteriormente, um conector DB9 através do qual são feitas a alimentação e comunicações com o sensor. As comunicações, em particular, realizam-se através da interface série RS-232, composta por três fios e a uma velocidade de 9600 bits por segundo (*baud rate*). A funcionalidade de cada um dos pinos do conector do Laser-Altímetro está descrita na Tabela 3-1 e na Figura 3-17 encontra-se um diagrama ilustrativo da correta ligação deste sensor ao *Piccolo*.

Tabela 3-2 - Descrição da funcionalidade de cada um dos pinos do conector do Sensor AGL. (Adaptado de (Latitude Engineering, 2008), "Table 2")

Pino	Descrição
1	Sem conexão
2	Tx (Ligado ao Rx do <i>Piccolo</i>)
3	Rx (Ligado ao Tx do <i>Piccolo</i>)
4	ATN (Utilizado para programar; Sem conexão durante a utilização)
5	Ground (Comunicações)
6	Sem conexão
7	Sem conexão
8	Ground (Alimentação)
9	Terminal Positivo (Alimentação; Vin: 7-36 VDC)

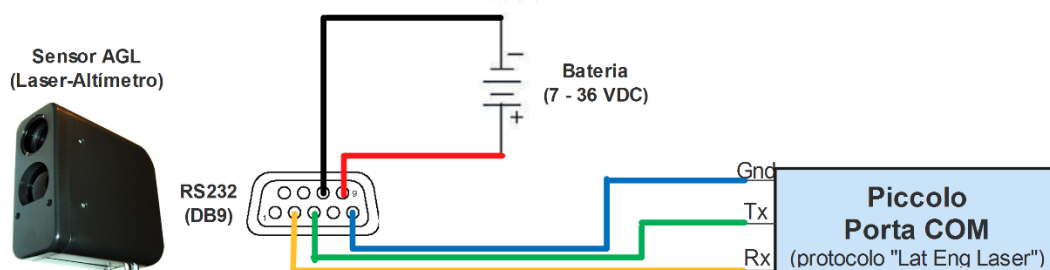


Figura 3-17 - Diagrama ilustrativo das ligações do Sensor AGL necessárias para o seu correto funcionamento com o *Piccolo*: ligação à bateria e a uma porta série do *Piccolo* (3 pinos).

3.4 Vantagens e Limitações dos sistemas DGPS e Laser-Altímetro

Tendo o *Piccolo* capacidade para realizar aterragens automáticas através da utilização dos sistemas DGPS e/ou Laser-Altímetro (UTC Aerospace Systems, 2014), é importante comparar os mesmos no que concerne às medições realizadas no canal vertical. Desta forma, as virtudes e limitações de ambos os sistemas foram compiladas na tabela seguinte.

Tabela 3-3 - Tabela comparativa entre os sistemas DGPS e Laser-Altímetro. (Informações extraídas de (Sabatini, et al., 2008), (Beamish, et al., 2010), (Mackay, 2005) e (Mattei, et al., 2003))

	DGPS	Laser-Altímetro
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Disponível 24h por dia, independentemente das condições atmosféricas; • Independente da superfície a sobrevoar; • Teoricamente mais preciso que o GPS; • Fornece informação de posição lateral e vertical; 	<ul style="list-style-type: none"> • Teoricamente mais preciso que o DGPS no canal vertical; • Não necessita de equipamento auxiliar no solo; • Permite aterragens automáticas mais suaves; • Baixo consumo energético; • Não depende de equipamento exterior à aeronave;
Limitações	<ul style="list-style-type: none"> • Mais suscetível a empastelamento; • Dependente das correções enviadas pela estação de referência no solo; • Os satélites utilizados pelo sistema a bordo devem ser os mesmos que a estação de referência está a utilizar; • Vulnerável a perdas de sinal devido a baixo SNR dos satélites; • Suscetível a vários tipos de erros como o multicaminho; 	<ul style="list-style-type: none"> • Afetado pelas condições atmosféricas e visibilidade; • Afetado pelo tipo de solo sobre a aeronave; • Apenas fornece informação de posição vertical, necessitando de outro sistema auxiliar para permitir a aterragem automática (e.g. GNSS, Inércia); • Medições instáveis/incorrectas sobre a água;
Custo	\$43.000 USD ²	\$7.800 USD ³

² Corresponde ao custo estimado da *ground station* com recetor DGPS integrado, da licença DGPS para o *Piccolo* e do kit DGPS para a aeronave. Dados fornecidos pela *Cloud Cap*.

³ Corresponde ao custo do Sensor AGL e da respetiva licença para o *Piccolo*. Dados fornecidos pela *Cloud Cap*.

3.5 Bibliografia

Adams, Martin, et al. 2012. *Robotic Navigation and Mapping with Radar*. Boston : Artech House, 2012. ISBN-13: 978-1-60807-482-2.

Allemann, Bogdan e Kaufman, Joely. 2011. Physical and Electronic Properties of Lasers - Laser Principles. *Basics in Dermatological Laser Applications*. Karge : s.n., 2011, Vol. 42, pp. 7-23.

Beamish, David e Leväniemi, Hanna. 2010. The canopy effect in AEM revisited: investigations using laser and radar altimetry. *Near Surface Geophysics*. abril de 2010, Vol. 8, pp. 103-115.

Bruzzi, Jonathan R., et al. 2012. A Compact Laser Altimeter for Spacecraft Landing Applications. *Johns Hopkins APL Technical Digest*. Número 4, 2012, Vol. 30.

Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing (CRISP) . 2001. Optical Remote Sensing. *National University of Singapore*. [Online] CRISP, 2001. [Consulta: 8 de dezembro de 2014.] <http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/optical.htm>.

Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing (CRISP). 2001. Microwave Remote Sensing. *National University of Singapore*. [Online] 2001. [Consulta: 8 de dezembro de 2014.] <http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/mw.htm>.

Department of Geography - University of Calgary. Remote Sensing and Soils. *University of Calgary*. [Online] [Consulta: 4 de dezembro de 2014.] <http://www.ucalgary.ca/UofC/faculties/SS/GEOG/Virtual/Remote%20Sensing/rssoils.html>.

EASA; European Commission. 2010. Laser Altimetry - SELEX Galileo. [Online] 2010. [Consulta: 16 de novembro de 2014.] http://ec.europa.eu/enterprise/policies/space/files/policy/conferences_page/workshop_2_ec_esa_29_april_2010/preti.pdf.

ESRI. *ArcGIS Resources*. [Online] ESRI. [Consulta: 12 de janeiro de 2015.] <http://resources.arcgis.com/en/home/>.

FCUL/DGT. 2014. GeodPT08. *Direção-Geral do Território*. [Online] DGT, 11 de novembro de 2014. [Consulta: 20 de dezembro de 2014.]

http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/geodesia/transformacao_de_coord_enadas/modelo_do_geoide/.

Fraczek, Witold. 2003. Mean Sea Level, GPS, and the Geoid. *ESRI*. [Online] Esri Applications Prototype Lab, julho de 2003. [Consulta: 16 de dezembro de 2014.] <http://www.esri.com/news/arcuser/0703/geoid1of3.html>.

Harding, David J. 2000. *Principles of Airborne Laser Altimeter Terrain Mapping*. NASA's Goddard Space Flight Center. Greenbelt : s.n., 2000.

Koch, Grady, et al. 2004. Coherent differential absorption lidar measurements of CO₂. *Applied Optics*. 2004.

Latitude Engineering. 2008. *AGL Sensor external interface and comms spec*. Tucson : s.n., 2008. p. 5.

— . 2014. Laser Altimeters. *Latitude Engineering Webside*. [Online] 2014. [Consulta: 21 de dezembro de 2014.] https://latitudeengineering.com/wp-content/uploads/2014/08/brochure_agl_web.pdf.

Lee, Kwok-san e Shiu-sing, Tong. Further physics - What is laser? [Online] [Consulta: 19 de novembro de 2014.] http://www.phy.cuhk.edu.hk/phyworld/articles/laser/laser_e.html.

Leme, Adriano, et al. Corrosão em Frestas. [Online] Faculdade de Tecnologia de Sorocaba. [Consulta: 22 de novembro de 2014.] http://www.ebah.com.br/content/ABAAABY_cAC/seminario-cores-1.

Liew, S. C. 2001. Optical Remote Sensing. *Centre for Remote Imaging, Sensing & Processing*. [Online] CRISP, 2001. [Consulta: 14 de janeiro de 2015.] <http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/optical.htm>

Lohani, Bharat. 2008. *Airborne altimetric LIDAR: Principle, data collection, processing and applications*. Departamento de Engenharia Civil , ITT Kanpur. Kanpur : s.n., 2008.

Mackay, Louise. 2005. Lecture 2: Electromagnetic Radiation Interactions with the Earth's Surface. *University of Leeds - School of Geography*. [Online] 2005. [Consulta: 4 de dezembro de 2014.] <http://www.geog.leeds.ac.uk/courses/level2/geog2750/Lecture2.doc>.

Mattei, Stefania, Santovito, M. Rosaria e Moccia, Antonio. 2003. *A new rangefinder system for microsatellite*. Naples : Consortium of Research on Advanced Remote Sensing Systems, 2003.

Melles Griot. Introduction to Laser Technology. [Online] [Consulta: 19 de novembro de 2014.] <http://www.astro.caltech.edu/~lah/ay105/pdf/Laser-Guide.pdf>.

myVMC. 2009. Lasers and your Health . [Online] 17 de julho de 2009. [Consulta: 23 de novembro de 2014.] <http://www.myvmc.com/lifestyles/lasers-and-your-health/>.

National Weather Service. 2002. Atmospheric Pressure and Altimeters. *The Front*. setembro-outubro de 2002, Vol. 1.

Nayar, Shree, Ramamoorthi, Ravi e Hanrahan, Pat. 2009. Lecture 8: Basic Principles of Surface Reflectance. *Carnegie Mellon University - School of Computer Science*. [Online] 2009. [Consulta: 4 de dezembro de 2014.] <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/academic/class/15462-f09/www/lec/lec8.pdf>.

Oxford Aviation Training. 2009. Pressure Altimeter. [autor do livro] Oxford Aviation Training. *JAA ATPL Aircraft Knowledge 4*. 5ª. s.l. : Oxford Aviation Academy, 2009, Vol. 5, 5, pp. 67-70.

Penzes, William B. Time Line for the Definition of the. *National Institute of Standards and Technology*. [Online] [Consulta: 4 de dezembro de 2014.] <http://www.nist.gov/pml/div683/upload/museum-timeline.pdf>.

Pestana, António. 2013. *Elementos de Geodesia*. Porto : Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2013.

RIEGL - Laser Measurement Systems. Operation of a Pulsed Laser Distance Meter. [Online] [Consulta: 18 de novembro de 2014.] http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegl/downloads/General-Information-Distancemeter.pdf.

Rockwell Laser Industries. Laser Standards and Classifications. [Online] [Consulta: 23 de novembro de 2014.] <http://www.rli.com/resources/articles/classification.aspx>.

Sabatini, R. e Palmerini, G. B. 2008. *RTO-AG-160-V21 - Differential Global Positioning System (DGPS) for Flight Testing.* Cedex : North Atlantic Treaty Organisation, 2008. Vol. 21.

Schappert, Jason. Types of Altitude. *MzeroA.com.* [Online] MzeroA.com. [Consulta: 20 de dezembro de 2014.] <http://www.m0a.com/different-types-of-altitude/>.

Sensor Central. Laser Standard (IEC). [Online] [Consulta: 23 de novembro de 2014.] <http://www.sensorcentral.com/worldsupport/standards07.php>.

United Nations Office for Outer Space Affairs. World Geodetic System 1984. *United Nations Office for Outer Space Affairs Website.* [Online] [Consulta: 20 de dezembro de 2014.] http://www.oosa.unvienna.org/pdf/icg/2012/template/WGS_84.pdf.

UTC Aerospace Systems. 2014. Cloud Cap Technology Piccolo II Data Sheet. [Online] janeiro de 2014. [Consulta: 14 de novembro de 2014.] <http://www.cloudcaptech.com/Sales%20and%20Marketing%20Documents/Piccolo%20II%20Data%20Sheet.pdf>.

Workman, Jerome. 2014. An Introduction to Near Infrared Spectroscopy. *SpectroscopyNOW.com.* [Online] 1 de julho de 2014. [Consulta: 8 de dezembro de 2014.] <http://www.spectroscopynow.com/details/education/sepspec1881education/An-Introduction-to-Near-Infrared-Spectroscopy.html>.

Capítulo 4 - Desenvolvimento e Implementação do Dispositivo de Testes

Antes da realização de testes para avaliar o desempenho do Sensor AGL, foi necessário desenvolver e implementar algoritmos e *software*, bem como construir suportes que os permitissem realizar. Neste capítulo são abordados todos os desenvolvimentos a nível de *software* e *hardware* realizados para permitir a execução destes testes.

4.1 Desenvolvimento e Implementação de Software

Embora o Sensor AGL apenas necessite do código/licença para operar corretamente com o *Piccolo*, as leituras de altitude AGL que este piloto-automático disponibiliza correspondem a valores extraídos do filtro de Kalman e não às leituras diretas do Sensor AGL em si. Desta forma, com o propósito de realizar uma análise o mais correta e objetiva possível a este equipamento, surgiu a necessidade de desenvolver um *driver* que o permitisse operar e recolher as leituras diretamente do mesmo, independentemente do *Piccolo*. Este *driver* permitirá também que, no futuro, este sensor seja utilizado em plataformas que não utilizem este piloto-automático, através da sua integração na arquitetura do projeto *Seagull*. Seguidamente implementou-se um *software* com GUI que, por um lado, permitisse a realização dos testes no solo de uma forma mais simples, e que por outro, constituísse um *software* para teste no solo deste tipo de equipamento para o CIAFA. Por outro lado, e uma vez que o sistema utilizado por este Centro nas suas plataformas é o ROS, para o teste em voo foi implementado um nó de leitura e publicação das medições diretas do Sensor AGL, assim como outros dois que, respetivamente, reúnam os dados pertinentes para o teste e os guardem num ficheiro de texto.

O *software* escolhido para a realização do pós-processamento dos dados recolhidos em testes foi o MATLAB. Com recurso a esta ferramenta, foram desenvolvidos *scripts* que permitiram realizar uma análise estatística e comparativa dos testes realizados no solo e em voo.

4.1.1 Desenvolvimento do *driver* (biblioteca de comunicação)

Tendo em conta os testes a realizar, os recursos existentes no CIAFA e a sua possível utilização futura, começou-se por definir a linguagem de programação a

utilizar para o desenvolvimento do *driver*. Dado que as placas de aquisição de dados utilizadas pelo CIAFA (PC/104) têm a generalidade do seu *software* desenvolvido em ROS (*Robotic Operating System*), procurou-se escolher uma de entre das três linguagens de programação suportadas pelo mesmo: *Lisp*, *Python* ou C++. A opção tomada foi a de desenvolver a biblioteca de comunicação em C++ pela necessidade de utilizar este código em outras aplicações, mas também devido à maior familiarização com a linguagem. Com o intuito de tornar o código mais versátil e mais claro para possíveis alterações futuras, optou-se também por desenvolver esta biblioteca com recurso a OOP (Programação Orientada a Objetos).

Apesar da linguagem C++ ser multiplataforma e a maioria das tarefas necessárias para realizar uma comunicação via porta série serem muito semelhantes tanto em *Windows* como em *Linux*, algumas não o são (como, por exemplo, a configuração da porta). Tornou-se assim necessário definir também para que sistema operativo seria criada a biblioteca, optando-se por desenvolvê-la em *Linux* por ser o sistema operativo utilizado nas placas PC/104.

4.1.1.1 Comunicação via Porta Série

Embora atualmente a grande maioria dos dispositivos comuniquem através de portas USB, ainda existem muitos equipamentos (principalmente os anteriores à existência do USB) que utilizam as portas série como meio de comunicação. Este tipo de portas são bidirecionais, ou seja, permitem que seja enviada informação em ambas as direções e, uma vez que têm diferentes pinos para receber e enviar dados, permitem a realização simultânea de ambos. Independentemente do sistema operativo, a comunicação via porta série pode ser dividida em quatro fases: a abertura da porta série; a configuração da porta; o envio/receção de dados; o fecho da porta.

O primeiro passo para iniciar uma comunicação via porta série é abrir a mesma. A nível de programação, tanto em *Windows* como em *Linux*, as portas série são tratadas do mesmo modo que ficheiros, pelo que são utilizadas as mesmas funções. Assim, para abrir a porta em *Linux* é utilizada a função 'open()' juntamente com o nome da porta série e os argumentos que definem o modo em que esta será aberta. No caso do *driver* para o Sensor AGL, a porta é aberta com os argumentos «O_RDWR | O_NOCTTY | O_NDELAY» que permitem receber e enviar dados de e para o sensor, evitam que introduções a partir do teclado influenciem as leituras recebidas e não esperam por uma conexão explícita por parte do sensor.

A segunda fase consiste em configurar a porta para receber corretamente a informação do Sensor AGL. É nesta fase que é definida a velocidade de comunicação (*baud rate*), o número de *bits* de dados, a paridade, o número de *bits* de paragem, entre outros. Em *Linux*, a configuração de uma porta série é feita em quatro etapas: é inicializada uma estrutura «termios» com as definições atuais da porta a ser utilizada; são modificados os valores e definições da estrutura para que correspondam à configuração necessária para operar o sensor (*baud rate*, paridade, entre outros); são definidos os *timeouts* da porta; as definições da estrutura são aplicadas à porta. Assim sendo, e de acordo com o protocolo de comunicações do Sensor AGL, a porta é configurada com um *baud rate* de 9600, 8 *bits* de dados, sem paridade, sem controlo de fluxo e com um *bit* de paragem. A mesma é também configurada para impedir que o seu controlo seja alterado após a configuração e, por motivos de compatibilidade, o modo canónico é também desativado.

Após a abertura e correta configuração da porta, é então possível enviar e receber dados através da mesma. Para tal, em *Linux*, são utilizadas as funções ‘read()’ e ‘write()’ para receber e enviar dados respetivamente. Para fechar a porta (após a sua utilização) é executada a função ‘close()’, impedindo que esta fique «bloqueada» para outras aplicações que a pretendam utilizar.

4.1.1.2 Definição do Protocolo de Comunicação

Todas as comunicações realizadas de e para o Sensor AGL são feitas mediante pacotes que, por sua vez, são compostos por dois *bytes* de sincronização, dois *bytes* de informação, os *bytes* que contêm os dados a transmitir e, por fim, dois *bytes* de verificação (*checksum*). É importante referir, para efeitos de desenvolvimento, que os valores compostos por mais de um *byte* (como o caso da altitude) são sempre enviados com o *byte* mais significativo primeiro (*Big-Endian order*). O tamanho total da mensagem varia de acordo com o tipo de pacote. A Figura 4-1 ilustra a definição genérica dos pacotes utilizados na comunicação com este sensor.

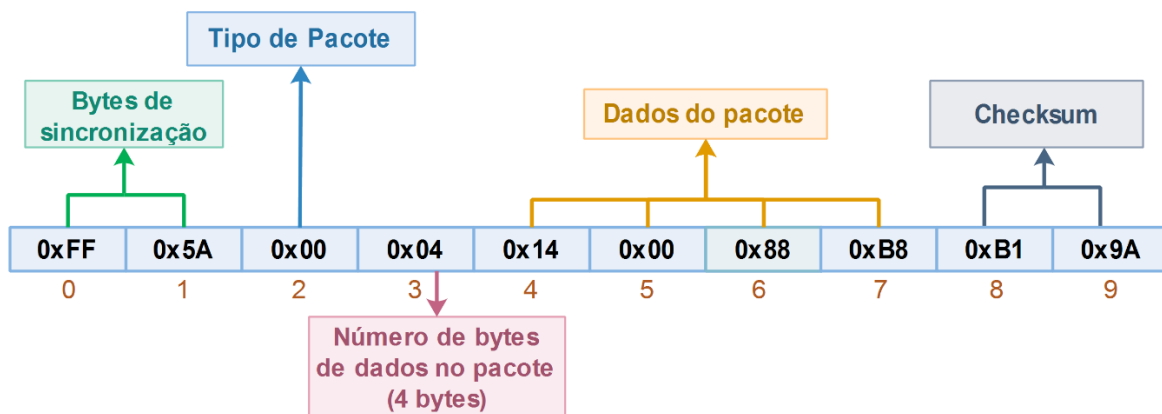


Figura 4-1 - Diagrama que ilustra a definição dos pacotes utilizados pelo Sensor AGL. A título de exemplo, neste diagrama é utilizado um pacote do tipo Reading.

Os primeiros dois *bytes* da mensagem, na Figura 4-1 representados como os *bytes* 0 e 1, são designados por *bytes* de sincronização e assumem sempre o mesmo valor: o primeiro 0xFF e o segundo 0x5A. A sua função é a de alertar o *software* de leitura para a possível «chegada» de um pacote válido. Os *bytes* 2 e 3 informam respectivamente qual o tipo de pacote, neste caso do tipo *Reading*, e o número de *bytes* de dados a receber na mensagem, neste caso 4 *bytes*. Seguem-se os 4 *bytes* de dados e por fim, os 2 *bytes* de verificação que permitem ao *software* averiguar a integridade da mensagem recebida.

4.1.1.3 Tipos de Pacotes

A atual versão do *firmware* presente no Sensor AGL suporta três tipos de pacotes distintos: *Reading*, *Laser Mode* e *Single*. Os seus valores e a respetiva descrição podem ser consultados na tabela seguinte.

Tabela 4-1 - Tipos de pacotes suportados pelo Sensor AGL.

Tipo	Valor	Descrição
<i>Reading</i>	0x00	Contém os dados de uma única leitura da altitude.
<i>Laser Mode</i>	0x01	Define as definições de leitura do sensor.
<i>Single</i>	0x02	Pede ao sensor para realizar uma única leitura.

Os pacotes *Reading* são compostos por quatro *bytes* de dados, contendo neles o valor da altitude medida pelo sensor e informações relativas ao tipo de leitura realizada. O primeiro *byte* de dados («Flags»), tal como ilustrado na Figura 4-2, diz respeito aos avisos e facultar informação acerca da qualidade da leitura (boa ou má), da sua resolução (alta ou baixa) e se esta foi feita tendo em conta o alvo mais próximo (*nearest target mode*) ou o mais distante (*farthest target mode*). Os restantes 3 *bytes*

formam um valor positivo de 24 bits (*unsigned*) que corresponde à altitude medida pelo sensor em milímetros.

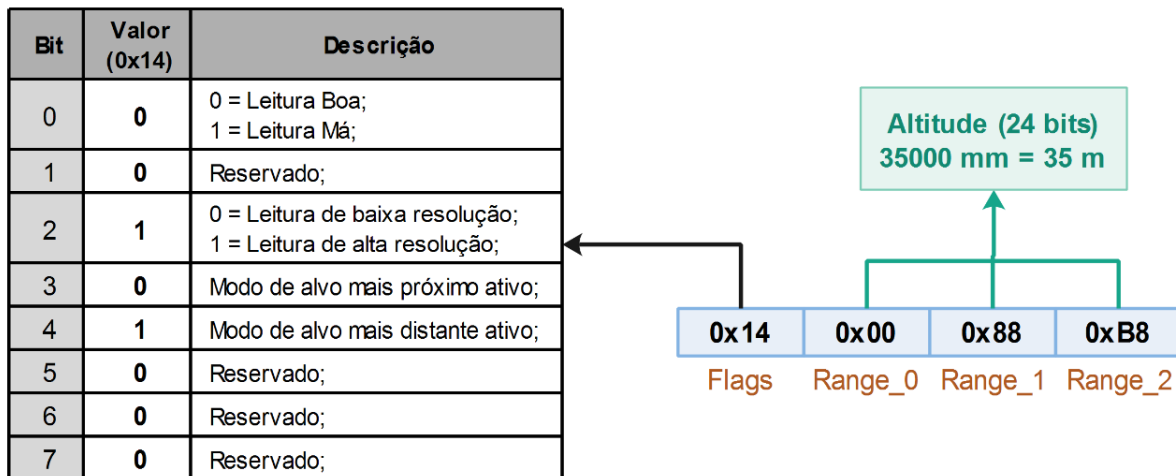


Figura 4-2 - Diagrama de possíveis dados contidos num pacote do tipo *Reading*. (A coluna «Valor» contém o valor do byte «Flags» em binário)

Os pacotes do tipo *Laser Mode* aplicam as definições de leitura desejadas no Sensor AGL. O equipamento, ao receber com sucesso um pacote deste tipo, irá aplicar as definições e enviar o pacote de volta. Os dados destes pacotes, tal como ilustrado na Figura 4-3, são compostos por três *bytes*. O primeiro, «Flags», permite ativar ou desativar as leituras contínuas e escolher o modo de leitura a ser utilizado (*nearest target mode* ou *farthest target mode*). Se ambos os modos forem ativados em simultâneo, as leituras serão feitas em modo de alvo mais próximo. Se ambos forem desativados ao mesmo tempo, não é feita alteração ao modo de leitura do sensor. O segundo *byte* permite definir o período de leitura para as medições contínuas, em unidades de 50 ms. No entanto, o atual *firmware* do sensor apenas permite velocidades até 1 Hz. Se for introduzido o valor 0xFF, o período não é alterado. O terceiro *byte* é reservado.

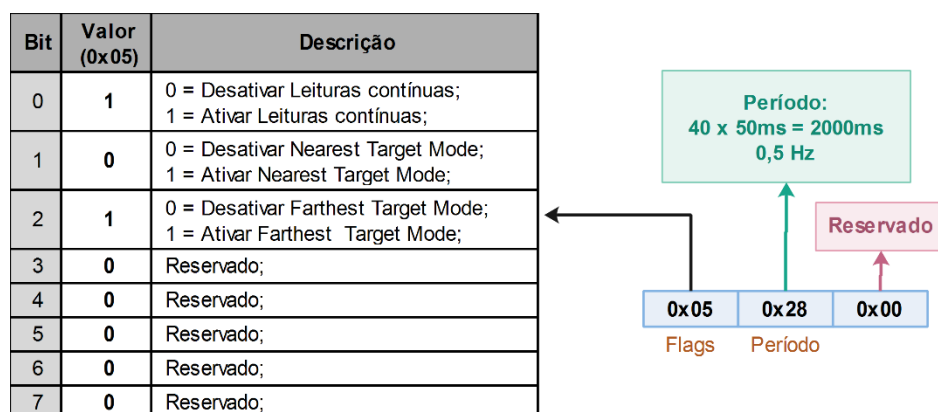


Figura 4-3 - Diagrama de possíveis dados contidos num pacote do tipo *Laser Mode*.

Os pacotes do tipo *Single*, quando enviados para o sensor, fazem com que este realize uma medição e transmita um pacote do tipo *Reading* com a mesma. Para minimizar atrasos na medição, esta é realizada de acordo com as definições de leitura na memória do sensor. Este tipo de pacote apenas contém um *byte* de dados com o valor de 0x05. A Figura 4-4 ilustra um pacote *Single* completo.

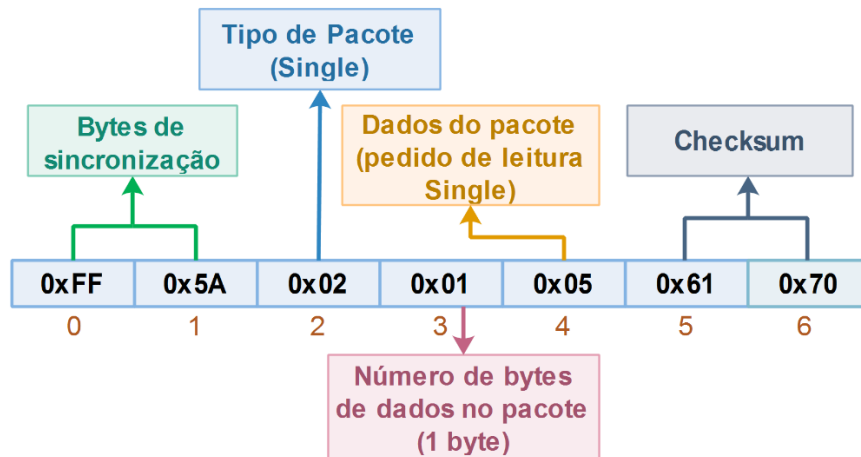


Figura 4-4 - Diagrama dos bytes contidos num pacote *Single* completo.

O envio dos pacotes *Single* e *Laser Mode* para o Sensor AGL é feito, após a abertura e correta configuração da porta série, mediante a chamada das funções 'writeSingle()' e 'laserMode()' da biblioteca desenvolvida, respetivamente. No caso particular da função 'laserMode()', esta recebe as definições de leitura enquanto argumentos, ao ser chamada.

4.1.1.4 O Algoritmo de Leitura

Tal como já referido, após a correta abertura e configuração da porta série, é possível iniciar a receção e envio de dados através da mesma. No entanto os pacotes de comunicação não são recebidos (nem enviados) todos de uma só vez, mas sim *byte a byte*. Para a leitura correta e integral de um pacote é necessário um algoritmo que consiga identificar o início do mesmo, guardar os *bytes* desse possível pacote e, no final, verificar a sua integridade (se o pacote está correto ou se há informação corrompida).

A solução implementada consiste numa máquina de estados não bloqueante, ou seja, um algoritmo que não obtém um pacote completo de uma só vez, mas sim por fases. A vantagem deste tipo de algoritmo é não haver bloqueio da aplicação até que seja recebido um pacote inteiro, permitindo assim ao utilizador do *driver* definir

No estado 1, é lido o próximo *byte* e caso este corresponda ao valor 0x5A (segundo *byte* de sincronização) a máquina passa para o estado 2. Caso contrário, a máquina regressa ao seu estado inicial (estado 0).

No estado 2, tendo a função já recebido com sucesso os dois *bytes* de sincronização, pode afirmar-se com algum grau de confiança que se está na presença de um pacote. Desta forma, esta lê os dois *bytes* seguintes (tipo de pacote e o número de *bytes* de dados do pacote) e passa para o estado 3.

No estado 3, são lidos todos os *bytes* de dados e os restantes dois *bytes* de *checksum*, concluindo, assim, a receção total do pacote e passando a máquina de estados para o estado 4.

No estado 4, o último estado da máquina, é feita a verificação de integridade do pacote recebido. Tal é feito a partir do cálculo do *checksum* do pacote (de acordo com o algoritmo apresentado seguidamente) e consecutiva comparação com os *bytes* de *checksum* recebidos. Se ambos coincidirem o pacote é considerado correto e guardado, caso contrário, o pacote é descartado. Em ambos os casos a máquina de estados passa para o estado 0, ficando preparada para receber um eventual novo pacote.

4.1.1.5 O Algoritmo de Verificação

A verificação da integridade dos pacotes recebidos é feita no estado 4 da máquina de estados, mediante o algoritmo de *checksum* de Fletcher (8 *bits*). Este passo é de grande importância pois permite evitar que pacotes com informação corrupta sejam tomados como válidos. Para a verificação, são declaradas duas variáveis de um *byte* enquanto acumuladores, cujo valor inicial é zero (e.g. variáveis A e B). Assim, é executado o algoritmo presente na eq. (3), em que x toma os valores entre 1 e o número total de *bytes* recebidos menos 2 (os dois últimos *bytes* de *checksum*).

$$\begin{aligned} A &= A + D[x] \\ B &= B + A \end{aligned} \quad (3)$$

Desta forma, são sempre incluídos no *checksum* todos os *bytes* de um determinado pacote, à exceção dos dois últimos. Após a execução do algoritmo, a variável A irá conter a soma de todos estes bytes e a variável B irá conter $(x) \cdot D[1] +$

$(x - 1) \cdot D[2] + \dots + D[x]$. Uma vez que as variáveis A e B são declaradas como *bytes*, caso a soma ultrapasse o tamanho de um *byte*, os *bits* mais significativos são descartados automaticamente pelo compilador. Estas variáveis são então comparadas com os *bytes* de *checksum* recebidos: a variável A é comparada com o primeiro *byte* e a B com o segundo. Caso sejam ambos iguais, o pacote é guardado e assumido como válido. Caso contrário, o pacote é descartado.

4.1.2 Desenvolvimento do software de Leitura

Para a realização dos testes no solo foi necessário o prévio desenvolvimento de um *software* de leitura, utilizando a biblioteca de comunicação criada anteriormente. O objetivo deste novo *software* consiste em, não só permitir a recolha de leituras do sensor durante os testes a realizar, mas também constituir uma interface de verificação e testes do Sensor AGL para o CIAFA. Devido ao facto do *driver* (biblioteca de comunicação) para este equipamento ter sido desenvolvido em C++, optou-se por desenvolver o *software* na mesma linguagem, juntamente com uma interface gráfica (GUI). A GUI foi desenvolvida com recurso ao *framework* Qt e tem por objetivo facilitar a visualização e a recolha de leituras no decorrer dos testes, como também tornar o *software* mais agradável e de fácil utilização para futuros utilizadores.

No sentido de cumprir estes propósitos e objetivos, o *software* desenvolvido apresenta as seguintes capacidades:

- Alteração das definições da porta série em uso;
- Apresentação da altitude e dos avisos constantes nos pacotes *Reading* recebidos;
- Envio de pedidos *Single*;
- Alteração das definições de leitura do Sensor AGL (mediante o envio de pacotes *Laser Mode*);
- Apresentação do registo das leituras no ecrã e gravação das mesmas em ficheiro de texto do tipo CSV (sendo o seu nome e localização escolhidos pelo utilizador);
- Inserção de marcações com comentários no ficheiro de registo de leituras (para assinalar dados ou acontecimentos pertinentes durante os testes);
- Opção de «programar» o *software* para adquirir um determinado número de amostragens e, seguidamente, parar a leitura (útil na realização dos testes estáticos);

A disposição final da GUI do *software* de leitura encontra-se na Figura 4-6, seguindo-se a legenda da mesma na Tabela 4-2.

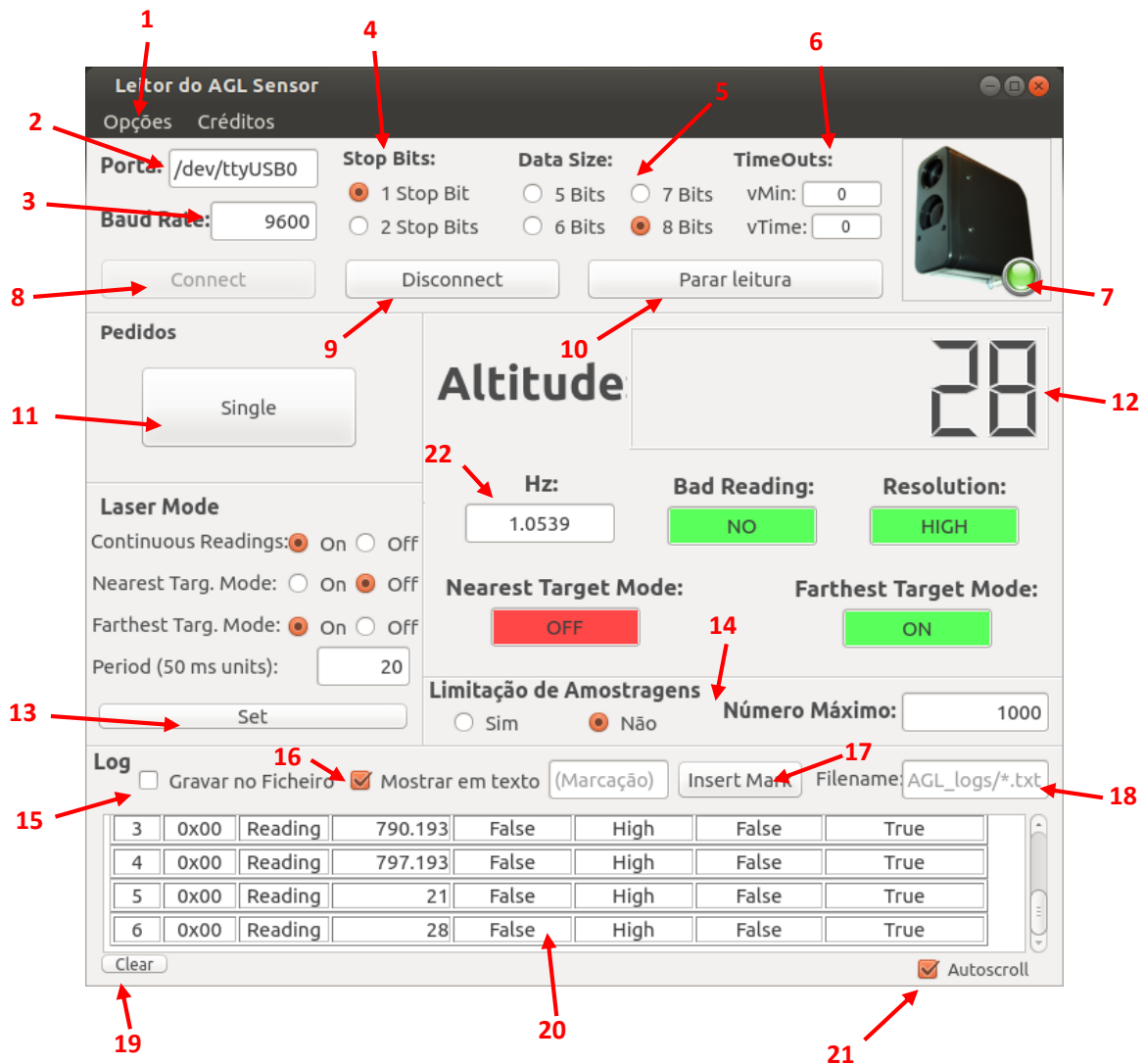


Figura 4-6 - Software de leitura desenvolvido para o Sensor AGL em pleno funcionamento.

Tabela 4-2 - Descrição dos campos assinalados na GUI da Figura 4-6.

Nº	Descrição
1	Menu Opções: permite ao utilizador repor os valores originais da GUI, assim como obter algumas informações sobre o funcionamento do <i>software</i> .
2	Campo de texto onde deve ser colocada a localização da porta série à qual está ligado o Sensor AGL.
3	Campo de texto onde deve ser colocado o <i>baud rate</i> do Sensor AGL.
4	Botões que permitem a seleção do número de <i>bits</i> de paragem para a comunicação via porta série.
5	Botões que permitem a seleção do número de <i>bits</i> de dados utilizados para a comunicação via porta série.

6	Campo de texto onde devem ser colocados os <i>timeouts</i> pretendidos para a comunicação via porta série.
7	«Luz» indicadora do estado de comunicação com o Sensor AGL: Vermelho – não conectado; Amarelo – conectado mas porta não configurada; Verde – conectado e porta corretamente configurada;
8	Botão que configura a porta indicada e inicia a conexão com o Sensor AGL.
9	Botão que fecha a porta utilizada pelo Sensor AGL.
10	Botão que inicia/para a visualização e gravação das medições recebidas do Sensor AGL.
11	Botão que permite enviar um pedido <i>Single</i> ao Sensor AGL.
12	Visualização da altitude determinada pelo Sensor AGL (em metros).
13	Botão que envia um pacote <i>Laser Mode</i> para o Sensor AGL com as definições escolhidas.
14	Campo que permite «programar» o <i>software</i> para parar a visualização e gravação de medições do sensor após um determinado número de leituras, escolhido pelo utilizador.
15	Permite ao utilizador escolher a gravação ou não do registo de leituras em ficheiro.
16	Permite ao utilizador escolher a apresentação ou não do registo de leituras no ecrã.
17	Botão que permite inserir uma marcação no ficheiro de registo de leituras.
18	Campo de texto onde é especificado o nome e localização do ficheiro onde serão registadas as leituras.
19	Botão que limpa a área de apresentação de leituras e avisos.
20	Área de apresentação de leituras e avisos.
21	Ativar/desativar o deslocamento automático da área de apresentação de leituras e avisos.
22	Indicação da frequência instantânea das leituras provenientes do Sensor AGL.

4.1.3 Desenvolvimento do *software* para o Teste em Voo

Para a realização do teste em voo, foi necessário o prévio desenvolvimento de *software* em ROS para, ao ser executado a bordo do UAV, realizar a recolha e gravação dos dados necessários ao teste, para posterior análise no solo. Estes dados incluem a informação de posição da plataforma, determinada a partir do sistema DGPS, a atitude de nariz e pranchamento da aeronave (*pitch* e *roll*), a pressão estática, a altitude AGL, entre outros.

A placa PC/104, utilizada a bordo das plataformas do CIAFA para recolha de dados de telemetria e dos sensores, contém duas portas série RS232 e duas portas USB que podem ser utilizadas para ligar diversos periféricos. Em particular, o sistema operativo utilizado na placa da plataforma *Alfa-Extended* utilizada para o teste é o *Debian Wheezy*, correndo o ROS *Hydro*. Desta forma, e utilizando o *driver* criado anteriormente, desenvolveram-se os nós de ROS essenciais para o teste em voo.

Existem cinco conceitos de ROS que são fundamentais para o funcionamento do *software* desenvolvido: *Node*, *Message*, *Topic*, *Subscribing* e *Publishing*. Um *node* ou nó de ROS é, de forma simples, um processo que realiza determinada tarefa no sistema. Estes nós podem comunicar uns com os outros através das mensagens (*Messages*), estruturas de dados que podem ser constituídas por diversos tipos de variáveis. No entanto, a comunicação entre nós não é feita explicitamente por via direta (envio da mensagem diretamente de um nó para outro), mas sim através de tópicos (*Topics*). Desta forma, os nós podem publicar (*Publishing*) mensagens em tópicos e inscrever (*Subscribe*) outros tópicos, recebendo as mensagens que neles forem publicadas (Open Source Robotics Foundation, 2014).

Como base para o desenvolvimento dos nós de ROS para o teste em voo, foram utilizadas as bibliotecas 'libarte' (*Advanced RunTime Environment*) e 'piccolosdk' desenvolvidas no CIAFA, assim como o nó 'Autopilot_Driver' (do projeto *Seagull*) e a mensagem de telemetria a ele associada. Os nós desenvolvidos e utilizados encontram-se ilustrados na figura seguinte.

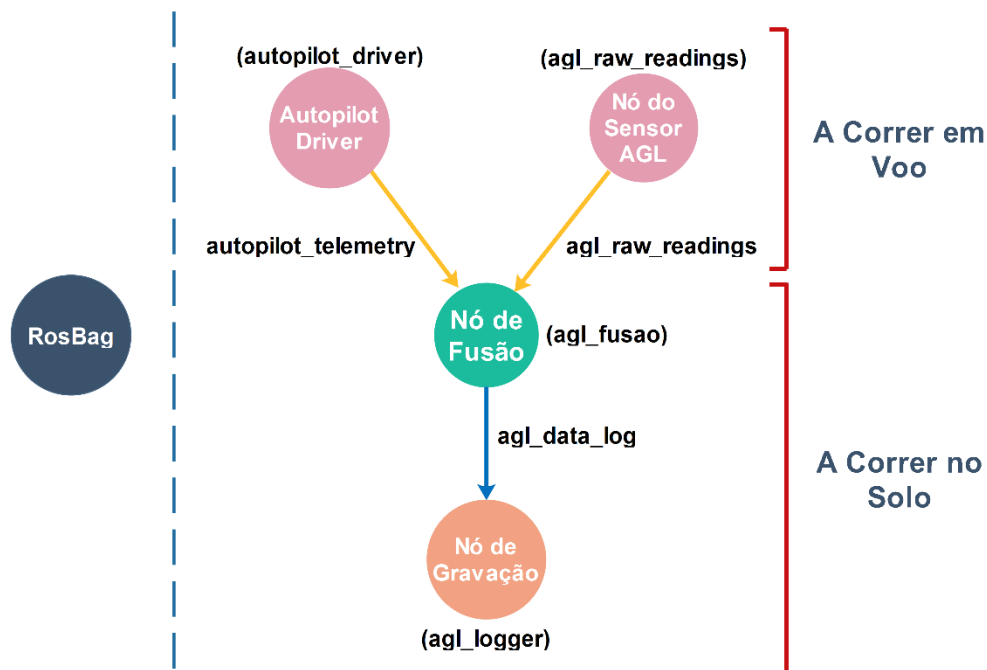


Figura 4-7 - Diagrama ilustrativo dos tópicos e nós de ROS utilizados para os testes em voo.

A biblioteca de comunicação com o Sensor AGL foi implementada no nó denominado 'agl_raw_readings' que, ao obter as leituras do sensor, publica-as o mais rapidamente possível no tópico 'agl_raw_readings'. O tópico recebe assim mensagens a uma frequência de cerca de 1 Hz (frequência teórica de funcionamento do sensor). A estrutura da mensagem publicada por este nó é apresentada na tabela seguinte.

Tabela 4-3 - Estrutura da mensagem 'Leitura_AGL_msg' publicada no tópico 'agl_raw_readings' pelo nó 'agl_raw_readings'.

Nome	Tipo	Unidades	Descrição
pktType	uint8	n/d	Tipo de pacote enviado pelo Sensor AGL.
flags	uint8	n/d	Flags enviadas pelo Sensor AGL.
altitude	float64	metros	A medição de altitude AGL realizada pelo Sensor AGL.

O nó 'autopilot_driver', através das bibliotecas 'libarte' e 'piccolosdk', permite o acesso do sistema ROS a diversas informações provenientes *Piccolo*. Entre elas, encontram-se os dados de telemetria que são essenciais para o teste em voo. Estes dados são publicados no tópico 'autopilot_telemetry' a uma frequência de 25Hz, sendo o conteúdo da mensagem o descrito na Tabela 4-4.

Tabela 4-4 - Estrutura da mensagem 'AutopilotTelemetry' publicada no tópico 'autopilot_telemetry' pelo nó 'autopilot_driver'.

Nome	Tipo	Unidades	Descrição
latitude	float32	graus	A latitude da posição do UAV.
longitude	float32	graus	A longitude da posição do UAV.
altitude	float32	metros	A altitude do UAV em relação ao elipsoide WGS84.
ias	uint16	m/s	Velocidade de ar indicada do UAV.
vx	int16	m/s	Componente x da velocidade em relação ao solo.
vy	int16	m/s	Componente y da velocidade em relação ao solo.
vz	int16	m/s	Componente z da velocidade em relação ao solo.
roll	float32	graus	Ângulo Euler do pranchamento do UAV.
pitch	float32	graus	Ângulo Euler da atitude de nariz do UAV.
yaw	float32	graus	Ângulo Euler da direção do UAV.
staticPressure	uint16	Pascal	A pressão barométrica do local onde se encontra o UAV em unidades de 2 Pa.
accelX	int16	0,005 m/s ²	Aceleração no eixo xx em unidades de 0,005 m/s ² .
accelY	int16	0,005 m/s ²	Aceleração no eixo yy em unidades de 0,005 m/s ² .
accelZ	int16	0,005 m/s ²	Aceleração no eixo zz em unidades de 0,005 m/s ² .
agl	uint16	metros	A altitude AGL do UAV proveniente do <i>Piccolo</i> .
OAT	int16	°C	A temperatura do ar no exterior em graus Celcius.

O nó denominado de 'agl_fusao' é o nó responsável por receber os dados de telemetria e de leituras AGL, fundi-los numa só mensagem e depois publicá-la. Para tal, este nó subscreve simultaneamente os tópicos 'autopilot_telemetry' e 'agl_raw_readings'. Uma vez que os dados de telemetria chegam com uma frequência superior à da altitude AGL, a solução encontrada para prevenir a dessincronização dos dados foi a de substituir continuamente os dados de telemetria na mensagem pelos mais recentes e, à chegada de uma medição AGL, a mensagem é guardada.

Desta forma, o máximo desfasamento entre a leitura AGL e os restantes dados é de 0,04 segundos. Por fim, o nó publica a mensagem guardada no tópico 'agl_data_log', sendo o seu conteúdo o apresentado na seguinte tabela.

Tabela 4-5 - Estrutura da mensagem 'Dados_log' publicada no tópico 'agl_data_log' pelo tópico 'agl_fusao'.

Nome	Tipo	Unidades	Descrição
latitude	float32	graus	A latitude da posição do UAV.
longitude	float32	graus	A longitude da posição do UAV.
altitude	float32	metros	A altitude do UAV em relação ao elipsoide WGS84.
agl_piccolo	uint16	metros	A altitude AGL do UAV proveniente do <i>Piccolo</i> .
pitch	float32	graus	Ângulo Euler da atitude de nariz do UAV.
roll	float32	graus	Ângulo Euler do pranchamento do UAV.
agl_raw_data	float64	metros	A medição de altitude AGL realizada pelo Sensor AGL.
agl_flags	uint8	n/d	<i>Flags</i> enviadas pelo Sensor AGL.
staticPressure	uint16	Pascal	A pressão barométrica do local onde se encontra o UAV em unidades de 2 Pa.
ias	uint16	m/s	Velocidade de ar indicada do UAV.
vx	int16	m/s	Componente x da velocidade em relação ao solo.
vy	int16	m/s	Componente y da velocidade em relação ao solo.
vz	int16	m/s	Componente z da velocidade em relação ao solo.
OAT	int16	°C	A temperatura do ar no exterior em graus Celcius.

O nó denominado de 'agl_logger' é o nó responsável por guardar os dados combinados de telemetria e altitude AGL, recebidos através do tópico 'agl_data_log'. Ao receber uma mensagem, este nó cria um ficheiro de texto do tipo CSV com o nome previamente escolhido, ou abre-o caso já exista, e grava nele as informações constantes na mensagem recebida.

Por motivos de performance e simplicidade, optou-se por utilizar uma ferramenta denominada de 'rosvbag' que, ao subscrever todos os tópicos ativos, realiza a gravação na íntegra de todas as mensagens. Posteriormente, esta gravação pode ser reproduzida, com a mesma ferramenta, replicando todas as publicações de mensagens durante o voo de forma sequencial. Dessa forma, no decorrer dos testes em voo, apenas estão em execução o nó 'autopilot_driver' do projeto *Seagull*, o nó 'agl_raw_readings' do Sensor AGL e o 'rosvbag'. Após o voo e, por ser mais conveniente, num outro computador é replicado todo o voo e executados os restantes nós, obtendo-se assim o ficheiro de texto do tipo CSV.

4.1.4 Pós-processamento de dados

Tal como referido anteriormente, a ferramenta escolhida para o pós-processamento dos dados foi o MATLAB. Tal escolha deveu-se à grande quantidade de dados a tratar, ao grande leque de funcionalidades disponíveis, bem como à possibilidade de criar *scripts* para realização da análise dos testes de forma automática.

4.1.4.1 Testes no Solo

Para cada um dos testes realizados no solo, foi criado um *script* que permitisse a análise completa dos dados neles recolhidos. Tirando as particularidades de alguns testes, a base destes *scripts* e o método de processamento dos dados é o mesmo para todos.

Os *scripts* começam por ler os dados contidos em cada um dos ficheiros de texto, correspondendo cada um deles a um ensaio de determinado teste, e guardam-nos em matrizes devidamente identificadas (cada matriz corresponde a um ensaio). Seguidamente, é feita uma análise estatística a todas as matrizes obtidas e, a partir dessa informação é criada uma nova matriz, a matriz 'matrix_calc'. Cada linha desta nova matriz é composta por um elemento identificador do ensaio (uma distância, um ângulo ou uma velocidade em função do teste) e pelas informações estatísticas de cada ensaio. As informações estatísticas nela presentes são: a média, o desvio padrão e os valores mínimos e máximos tanto das medições realizadas como das frequências instantâneas dessas medições, bem como a percentagem de más leituras e de leituras de baixa/alta resolução. Esta matriz é apresentada e, seguidamente, são feitos e exibidos os gráficos a partir da informação contida na mesma.

4.1.4.2 Teste em Voo

O Laser-Altímetro, tal como já exposto no capítulo anterior, obtém a altitude AGL através da medição da distância desde o solo à vertical da plataforma até ao sensor nela instalado. Torna-se assim essencial para a análise do seu desempenho em voo, a posse de informação topográfica da zona onde são realizados os voos.

Os voos das plataformas UAV do CIAFA são, na sua maioria, realizados no CFMTFA, mais rigorosamente no interior de um círculo com um raio de três milhas náuticas centrado no ARP do aeródromo da Ota. Desta forma, após contacto com o IGeoE e esclarecimento de dúvidas em relação aos dados disponíveis, optou-se por

solicitar, ao mesmo, informação digital da zona da Ota. Esta informação foi disponibilizada em formato vetorial «*Shapefile*» (ver a Figura 4-8), contendo curvas de nível, pontos de cota e marcos geodésicos, e utilizando como referências o elipsoide WGS84 (a nível planimétrico) e o marégrafo de Cascais (a nível altimétrico).

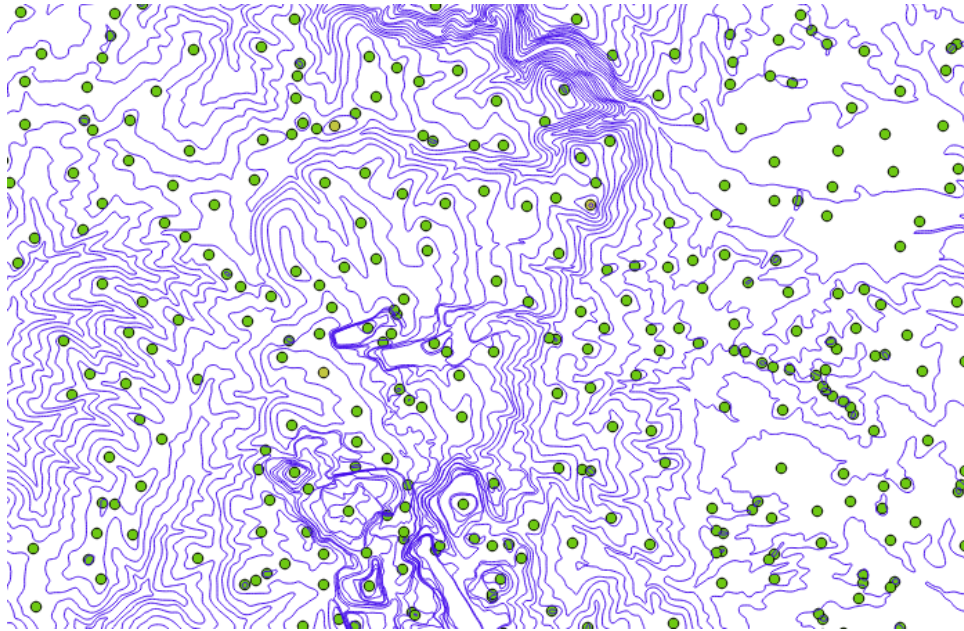


Figura 4-8 - Representação parcial dos dados vetoriais fornecidos pelo IGeoE.

No entanto, com o objetivo de simplificar e acelerar o algoritmo de pós-processamento, foi tomada a decisão de converter os dados topográficos para formato *raster* (uma grelha em que é dado o valor da elevação do terreno para vários pontos em função da sua longitude e latitude). Para tal recorreu-se ao *software* ArcGIS e, a partir dos dados em formato vetorial, foram gerados dois *rasters* com resoluções de cerca de 6m e 0,6m a nível planimétrico, guardando-os em ficheiros de texto do tipo CSV. Por motivos de performance, o *raster* utilizado pelo algoritmo de pós-processamento foi o com 6m de resolução.

Por outro lado, uma vez que o referencial altimétrico dos dados topográficos é o nível médio das águas do mar (através do marégrafo de Cascais) e que o do sistema DGPS é o elipsoide WGS84, tornou-se necessário recorrer a um modelo do geóide digital aplicável na zona onde são realizados os testes em voo. A solução encontrada foi a utilização do modelo do geóide 'GeodPT08' para Portugal Continental, para permitir a conversão da altitude dada pelo DGPS (elipsoidal) numa altitude ortométrica. Este modelo está disponível no *website* da Direção-Geral do Território em formato *raster*, e contém a ondulação do geóide em relação ao elipsoide GRS80

(Direção-Geral do Território, 2014), por ser este o elipsoide utilizado pelo sistema de referência ETRS89 (sistema fixo à parte estável da placa euro-asiática). No entanto, e uma vez que atualmente a diferença entre os sistemas ETRS89 e o WGS84 “é de cerca de 25 cm, não tendo grande impacto no posicionamento” (Gonçalves, 2008), estes são considerados idênticos para efeitos de testes nesta dissertação.

Foi criado assim, em MATLAB, um *script* que permitisse avaliar a performance do Sensor AGL durante o voo, recorrendo ao ficheiro com os dados e leituras recolhidas em voo, ao ficheiro com o *raster* da ondulação do geóide e ao ficheiro com o *raster* dos dados topográficos. Uma vez que os *rasters* apenas fornecem dados de elevação para valores de posição bem definidos, tornou-se necessário interpolar as superfícies do geóide e do terreno. De entre dos métodos de interpolação disponíveis na função ‘*griddata()*’ do MATLAB (a função utilizada no *script* para realizar a interpolação), o escolhido foi o dos vizinhos naturais por apresentar o menor valor de erro RMS (Garnero, et al., 2013). Este método “utiliza a triangulação de Delaunay e o diagrama de Voronoi ou Thiessen (..) para descobrir uma vizinhança mais apropriada para obter a altitude de um dado ponto” (Matos, 2005). Por outras palavras, o algoritmo deteta quais os pontos mais convenientes em torno do ponto cuja elevação se pretende determinar e, a partir desses e de acordo com um esquema de pesos, determina o seu valor. As superfícies interpoladas podem ser observadas nas Figuras 4-9 e 4-10.

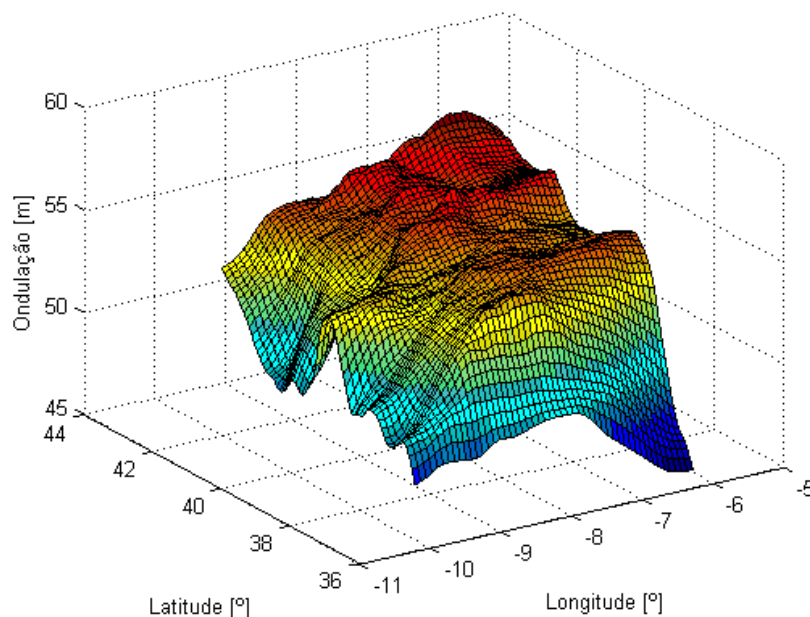


Figura 4-9 - Superfície interpolada da ondulação do Geóide de acordo com o modelo GeodPT08.

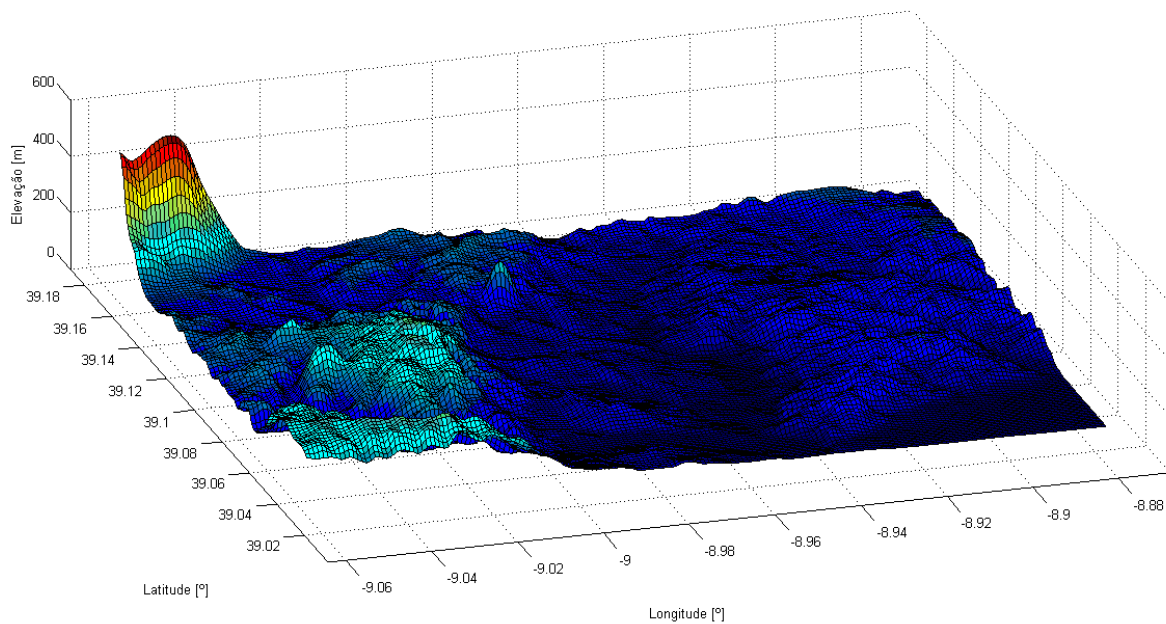


Figura 4-10 - Superfície Interpolada da elevação do terreno na zona da Ota de acordo com os dados fornecidos pelo IGeoE.

A fim de avaliar a performance do Laser-Altímetro, para cada posição da plataforma UAV registada durante o teste realizado em voo, é determinada a elevação do terreno e a ondulação do geóide. Seguidamente, à altitude determinada pelo sistema DGPS é subtraído o valor interpolado da ondulação do geóide nesse mesmo ponto, obtendo-se a altitude ortométrica teórica. A esta mesma altitude é posteriormente subtraída a elevação do terreno determinada para esse ponto, obtendo-se assim a altitude AGL teórica da plataforma UAV.

No entanto, devido à atitude de nariz e pranchamento do UAV, a distância medida pelo Sensor AGL apenas deve ser igual à altitude AGL teórica quando os ângulos de pranchamento e de nariz (*roll* e *pitch*) são nulos: caso contrário, a distância medida é sempre superior. Para corrigir este erro, são utilizados os valores destes dois ângulos (determinados pelo *Piccolo* e presentes no registo de leitura) e a leitura do Laser-Altímetro é considerada como se de uma diagonal de um prisma se tratasse. Considerando a leitura do Sensor AGL como o comprimento da diagonal \overline{AB} da Figura 4-11, e α e β os ângulos de *pitch* e *roll* respetivamente, pretende-se determinar a distância \overline{AC} . Sabendo que a diagonal de um prisma é dada por $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ (Weisstein) em que $x = \overline{CD}$, $y = \overline{CE}$ e $z = \overline{AC}$, temos que:

$$\overline{AB}^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad (4)$$

Como pela definição de tangente temos que: $\tan \alpha = \frac{x}{z}$ e $\tan \beta = \frac{y}{z}$, então:

$$\overline{AB}^2 = \tan^2 \alpha \cdot z^2 + \tan^2 \beta \cdot z^2 + z^2 \quad (5)$$

Assim temos que:

$$z^2 = \frac{\overline{AB}^2}{\tan^2 \alpha + \tan^2 \beta + 1} \Leftrightarrow$$

$$z = \sqrt{\frac{\overline{AB}^2}{\tan^2 \alpha + \tan^2 \beta + 1}} \quad (6)$$

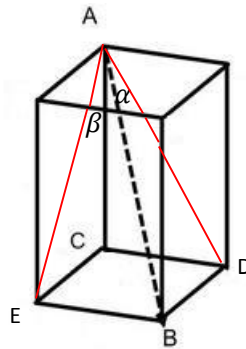


Figura 4-11 - Ilustração da correção da altitude AGL em função da atitude de nariz e pranchamento da plataforma UAV.

Desta forma é determinado o valor z da eq. (6) para cada medição do Sensor AGL sendo, posteriormente, comparado com a altitude AGL teórica.

Para fins comparativos, as medições do Laser-Altímetro e a altitude AGL teórica (obtida a partir do DGPS) são também comparadas com a altitude barométrica. Uma vez que não foi possível extrair esta altitude diretamente dos dados de telemetria do *Piccolo*, optou-se por calculá-la a partir da pressão estática registada, tendo em conta a atmosfera padrão. Para tal, foi aplicada a seguinte fórmula que relaciona a pressão atmosférica num local e a pressão atmosférica ao nível médio das águas do mar com a altitude (Cavcar):

$$P_{est} = P_0 \left(1 - 0,0065 \frac{h}{T_0}\right)^{5,2561} \Leftrightarrow \left(\frac{P_{est}}{P_0}\right)^{\frac{1}{5,2561}} = 1 - 0,0065 \frac{h}{T_0} \Leftrightarrow$$

$$h = \frac{\left(1 - \left(\frac{P_{est}}{P_0}\right)^{\frac{1}{5,2561}}\right) \cdot T_0}{0,0065} \quad (7)$$

Nesta fórmula a temperatura ao nível médio das águas do mar (T_0) encontra-se em *Kelvin*, a altitude (h) em metros e a pressão atmosférica ao nível médio das águas

do mar e no local (P_0 e P_{est}) em hectopascals. Assim, utilizando a pressão atmosférica ao nível médio das águas do mar quando são realizados os testes, obtemos a altitude AMSL da plataforma. A essa altitude é subtraída a elevação do terreno para a posição onde se encontra o UAV, obtendo-se assim uma altitude AGL a partir da altitude barométrica (comparável com a altitude AGL teórica e com as medições do Laser-Altímetro).

Por fim, através dos dados calculados, são gerados gráficos que permitem a comparação das medições do Sensor AGL com as restantes.

4.2 Desenvolvimento e Implementação de Hardware

Para a realização dos testes propostos, além do desenvolvimento de *software*, foi necessário uma prévia escolha e preparação de material auxiliar que permitisse a realização dos mesmos da forma planeada. Esta preparação inclui não só a construção de suportes para os testes no solo, mas também a montagem e ligação do Laser-Altímetro na plataforma UAV para os testes em voo.

4.2.1 Testes no Solo

No âmbito dos testes no solo, começou-se por construir um suporte para o Sensor AGL que permitisse a sua fixação com diversos ângulos de incidência em relação a diversas superfícies, possibilitando a realização dos testes em solo planeados. A solução encontrada foi a construção de um suporte em madeira e compósito, permitindo a sua fixação a diversos objetos mediante o uso de um torno de mesa (ver Figura 4-12).

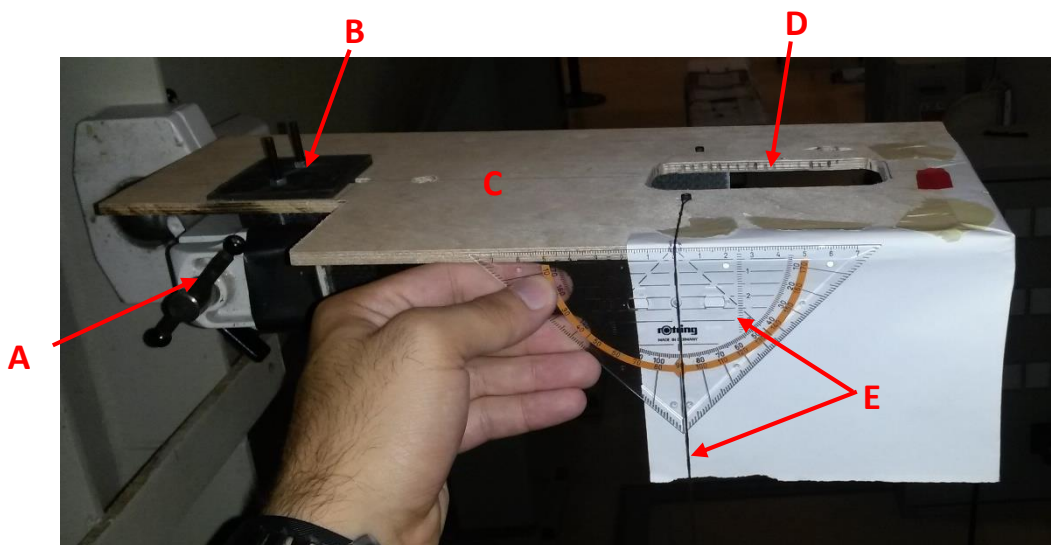


Figura 4-12 – Suporte do Sensor AGL construído para os testes no solo.

[**A** – Torno de mesa portátil utilizado para fixar o suporte; **B** - «T» em compósito fixo ao suporte de madeira; **C** – Suporte de madeira; **D** - Orifício para colocação do Sensor AGL; **E** – Esquadro aristo e pêndulo vertical para medição do ângulo do suporte]

Com o objetivo de atenuar os erros originados pela reflexão do feixe em determinados tipos de superfícies, optou-se pela utilização de um obstáculo uniforme e refletor nos ensaios estáticos a 90° em laboratório. Esta superfície consiste numa placa de madeira com dimensão aproximada de 60cm x 60cm forrada com papel branco (ver Figura 4-13). Esta solução permitiria, teoricamente, ensaios até cerca de 200m de distância.



Figura 4-13 - Obstáculo utilizado para os testes estáticos a 90° em laboratório (ainda não forrado).

Para os testes em laboratório para vários ângulos de incidência, por motivos logísticos, foi utilizada enquanto superfície refletora uma placa de espuma *BASF Styrodur® 2500 CN* (ver Figura 4-14).

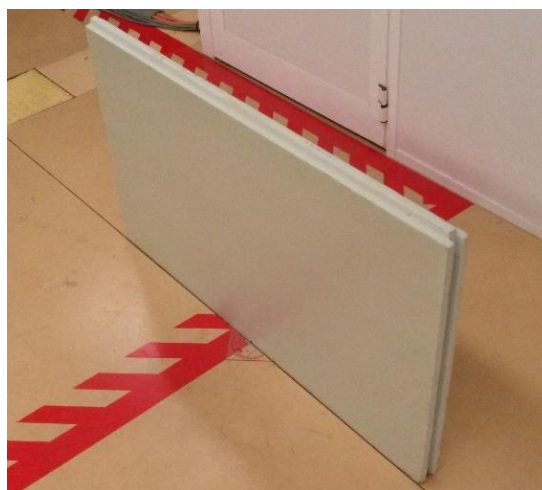


Figura 4-14 - Obstáculo utilizado nos testes em laboratório para vários ângulos de incidência (placa de espuma *BASF Styrodur® 2500 CN*).

Para os testes realizados na Ota, o teste estático para grandes distâncias e o teste para vários ângulos de incidência a 50 metros, recorreu-se ao uso de uma estação total *Leica TCRT1201* (com o apoio da Direção de Infraestruturas) para a marcação exata das distâncias e ângulos para a realização dos vários ensaios.

Para os testes em movimento, construiu-se um «braço extensor» para o suporte do Sensor AGL, de modo a que fosse possível realizar medições sobre a vegetação nas imediações da pista, com a viatura a circular na mesma. Para tal, foi escolhido e preparado um tubo de alumínio com 2m de comprimento, 2,5cm de diâmetro e 2mm de espessura.



Figura 4-15 - «Braço extensor» para o suporte do Sensor AGL, construído para os testes em movimento.

Adicionalmente, ao longo destes testes, foi necessário recorrer também ao uso de um suporte tripé em alumínio, uma fonte de alimentação, um gerador elétrico portátil, um computador portátil, uma fita métrica (classe II), um esquadro aristo e um pêndulo vertical.

4.2.2 Teste em voo

Para a realização do teste em voo, foi necessária a prévia e correta instrumentação do UAV. Nesse sentido, procedeu-se à instalação do Sensor AGL na plataforma *Alfa-Extended 00* do CIAFA de acordo com as recomendações do fabricante (já anteriormente referidas). Dado que este sensor não possui de origem nenhum meio físico que permita a sua fixação à plataforma, foi necessária a construção de um suporte, no interior do UAV, que permitisse acondicioná-lo devidamente. Para tal, começou-se por identificar a posição onde o Sensor AGL seria instalado, abrindo-se um orifício na fuselagem para as lentes do mesmo (Figura 4-16).

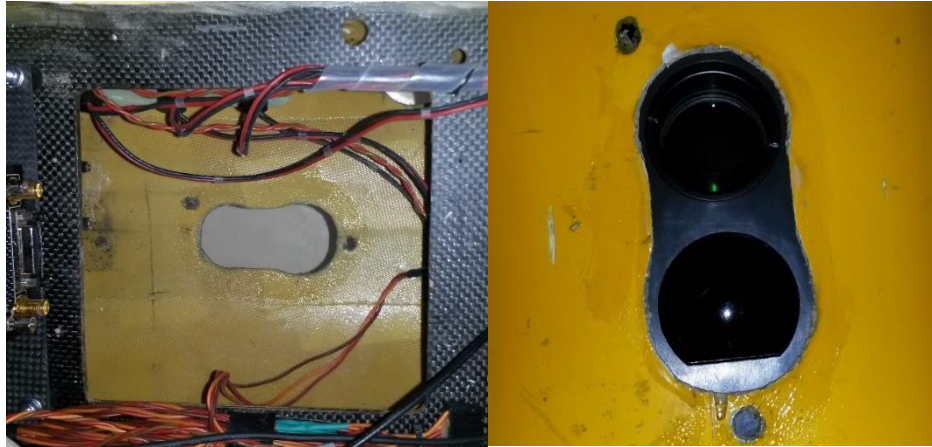


Figura 4-16 - Orifício aberto na fuselagem da plataforma para as lentes do Sensor AGL visto de cima (esquerda), e visto de baixo após a montagem do sensor (direita).

O suporte interior foi construído com recurso a madeira de balsa e epóxi, utilizando-se duas abraçadeiras de *nylon* para imobilizar o sensor. Desta forma, com a plataforma no solo, a distância entre o Sensor AGL e a superfície é de cerca de 20cm. A figura seguinte mostra o Sensor AGL instalado na plataforma, devidamente acondicionado, juntamente com o equipamento utilizado para os testes em voo.

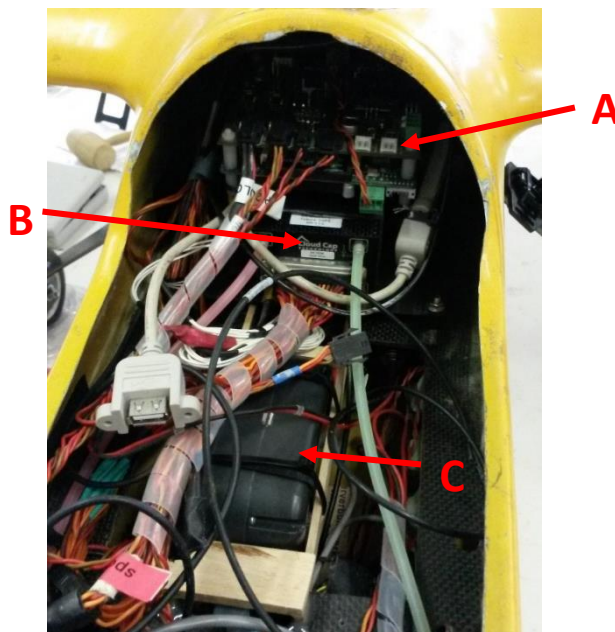


Figura 4-17 - Equipamento utilizado nos testes em voo e o Sensor AGL devidamente instalado.

[A – Placa de aquisição de dados PC/104; B – *Piccolo*; C – Sensor AGL devidamente instalado]

Uma vez que, por motivos logísticos, não foi possível utilizar o Sensor AGL conectado diretamente ao *Piccolo* para a realização de aterragens automáticas e

testes, o dispositivo utilizado para os testes em voo foi o apresentado na figura seguinte.

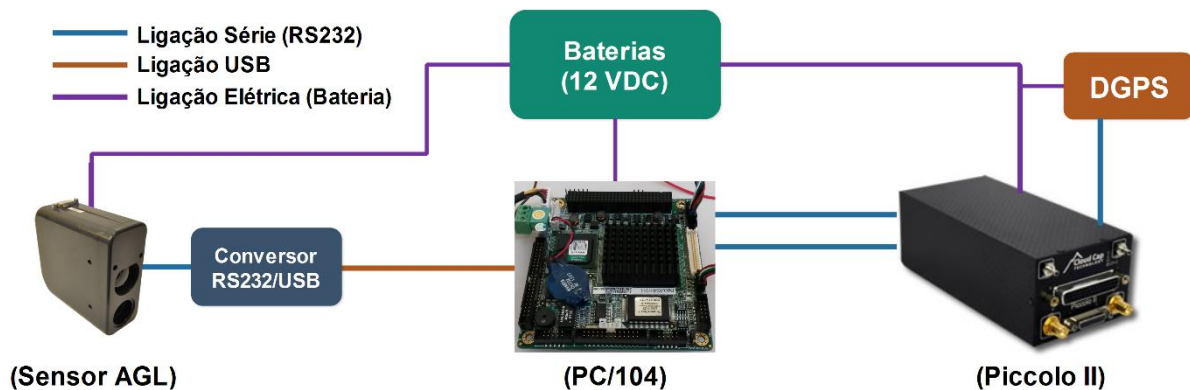


Figura 4-18 - Diagrama ilustrativo das ligações existentes entre equipamentos no decorrer dos testes em voo.

As duas portas série disponíveis na PC/104 foram conectadas ao *Piccolo*, uma para receção de dados de telemetria outra para comunicações entre o *payload* e o piloto-automático. Uma vez que o Sensor AGL também comunica através de porta série, optou-se por utilizar um conversor USB/RS232 para permitir a sua conexão com a placa de aquisição de dados. Desta forma ficam ocupadas todas as portas série e uma das duas portas USB disponíveis na placa de computação. A nível energético, todos os equipamentos a bordo da plataforma são alimentados com baterias de 12V.

Por fim, o *software* desenvolvido foi colocado e testado na PC/104, e o *Piccolo* devidamente configurado tendo em conta os equipamentos ligados às suas portas série (nomeadamente o DGPS).

4.3 Bibliografia

Cavcar, Mustafa. *The International Standard Atmosphere (ISA)*. Eskisehir, Turkey : Anadolu University.

Direção-Geral do Território. 2014. GeodPT08. *Direção-Geral do Território*. [Online] DGT, 11 de novembro de 2014. [Consulta: 15 de fevereiro de 2015.] http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/geodesia/transformacao_de_coord_enadas/modelo_do_geoide/.

Garnero, Gabriele e Godone, Danilo. 2013. Comparisons Between Different Interpolation Techniques. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. The Role of Geomatics in Hydrogeological Risk, fevereiro de 2013, Vols. XL-5/W3.

Gonçalves, José Alberto. 2008. *Adopção de Sistemas de Referenciação Geográfica Globais*. Porto : Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2008.

Latitude Engineering. 2008. *AGL Sensor external interface and comms spec.* Tucson : s.n., 2008. p. 5.

Matos, Ana Cristina. 2005. *Implementação de modelos digitais de terreno para aplicações na área de geodésia e geofísica na América do Sul.* São Paulo : Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

Open Source Robotics Foundation. 2014. ROS Introduction. *ROS wiki.* [Online] Open Source Robotics Foundation, 2014. [Consulta: 21 de dezembro de 2014.] <http://wiki.ros.org/ROS/Introduction>.

Walter, Maxwell. 2003. *Serial Port Programming in Windows and Linux.* 2003. p. 10.

Weisstein, Eric W. Cuboid. *MathWorld.* [Online] Wolfram Research. [Consulta: 16 de fevereiro de 2015.] <http://mathworld.wolfram.com/Cuboid.html>.

Capítulo 5 - Testes e Análise de Resultados

Com todo o *software* desenvolvido e testado e com todo o equipamento auxiliar construído e disponível, reuniram-se as condições para dar início aos testes no solo e em voo. Estes testes têm por objetivo avaliar a performance do Sensor AGL em diversas situações estáticas e dinâmicas, permitir a identificação das suas limitações e determinar se este constitui ou não uma mais-valia, em termos de exatidão altimétrica, face ao sistema DGPS. Em todos os testes realizados, o Sensor AGL encontrava-se configurado para obter leituras de forma contínua à frequência de 1Hz, tendo o modo de alvo mais distante ativo (*farthest target mode*).

5.1 Testes no Solo

Sendo os primeiros a ser realizados, os testes no solo têm a finalidade de avaliar o desempenho do Sensor AGL, em termos de precisão e exatidão, em situações bem definidas. Este tipo de testes permite assim, isolar e identificar quais as fontes de erro mais condicionantes para o sensor, sejam elas geradas pela plataforma em que este está instalado (altitude, atitude e pranchamento, velocidade, vibrações) ou pelo ambiente que o rodeia (superfície sobre a qual incide o feixe, ruído, atenuação atmosférica). Estes testes são também realizados com o intuito de procurar possíveis limitações do equipamento para determinadas condições de voo e, conseqüentemente, para o teste em voo. Assim, foi tomada como referência para a avaliação do Sensor AGL, o erro médio do sistema DGPS determinado experimentalmente noutra dissertação⁴: **75cm**.

Os testes no solo podem ser divididos em dois grupos: os testes estáticos e os testes em movimento. Os testes estáticos são constituídos por testes a várias distâncias, com vários ângulos de incidência e em várias superfícies refletoras. Os testes em movimento resumem-se a ensaios a várias velocidades sobre dois tipos de superfície diferentes.

⁴ Marques, Pedro Gonçalo. 2014. *Validação de um sistema DGPS para navegação de UAV's do projeto PITVANT*. Sintra : Academia da Força Aérea, 2014.

5.1.1 Procedimento Pré-Ensaio

Com o objetivo de uniformizar os testes no solo e evitar incoerências nos resultados obtidos, foi definido um conjunto de procedimentos a cumprir antes do início dos ensaios, sendo executados pela seguinte ordem:

1. Realizar a limpeza das lentes do Sensor AGL;
2. Colocar o Sensor AGL no seu suporte;
3. Fixar o suporte do Sensor AGL ao torno, à distância desejada da superfície refletora;
4. Colocar o suporte do Sensor AGL na posição correta para o teste a executar, verificando a orientação do mesmo através de um pêndulo vertical e de um esquadro aristo;
5. Conectar os cabos entre o Sensor AGL, a fonte de alimentação e o computador;
6. Abrir o *software* de leitura para os testes e ligar a fonte de alimentação;
7. Verificar o funcionamento do Sensor AGL (através do *software* de leitura);
8. Iniciar o teste.

5.1.2 Testes Estáticos

5.1.2.1 Teste a várias distâncias em laboratório

O teste a várias distâncias em laboratório foi realizado com o objetivo de avaliar a exatidão do Sensor AGL na medição de curtas distâncias até um máximo de 3 metros (considerado como o intervalo de altitudes mais crítico da aterragem), em condições ideais, com recurso a uma superfície uniforme e refletiva construída previamente. Nestas circunstâncias é possível verificar se existem, ou não, erros sistemáticos nas medições realizadas pelo sensor, bem como aferir a qualidade das mesmas.

Para este teste foram utilizadas como referências:

- Fita métrica *Stanley* de 3 metros com classe de exatidão II (erro máximo de 0,9mm em todo o seu comprimento) para a medição da distância entre o sensor e a superfície refletora;
- Esquadro aristo *Rotring*, aliado a um pêndulo vertical para medição do ângulo de incidência do feixe em relação à superfície;

Desta forma, foram realizados um total de 11 ensaios com o feixe Laser a 90° com a superfície refletora, às distâncias de: 0,03m; 0,1m; 0,2m; 0,4m; 0,6m; 0,8m; 1m;

1,5m; 2m; 2,5m; 3m. Em cada um destes ensaios foram recolhidas 1000 leituras do Sensor AGL de forma a constituir uma amostra estatisticamente relevante para análise. A figura seguinte ilustra o dispositivo utilizado nos ensaios realizados.

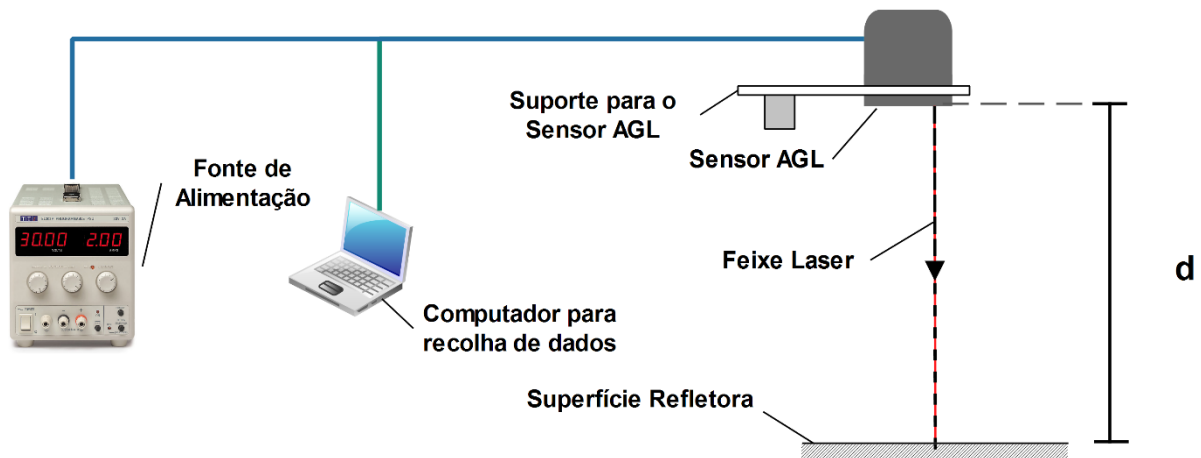


Figura 5-1 - Diagrama ilustrativo do dispositivo utilizado para os testes a várias distâncias em laboratório.

Após a conclusão de todos os ensaios, foi executado o *script* para pós-processamento dos dados recolhidos, obtendo-se os resultados seguidamente apresentados.

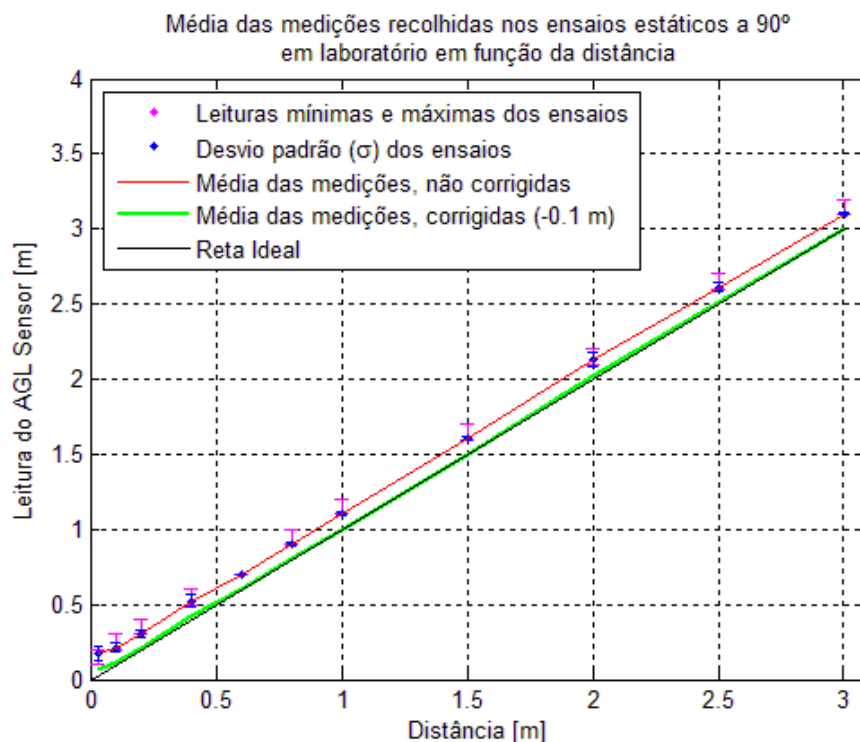


Figura 5-2 - Gráfico que apresenta a média das leituras do Sensor AGL em função da distância (real) a que foram realizados os ensaios.

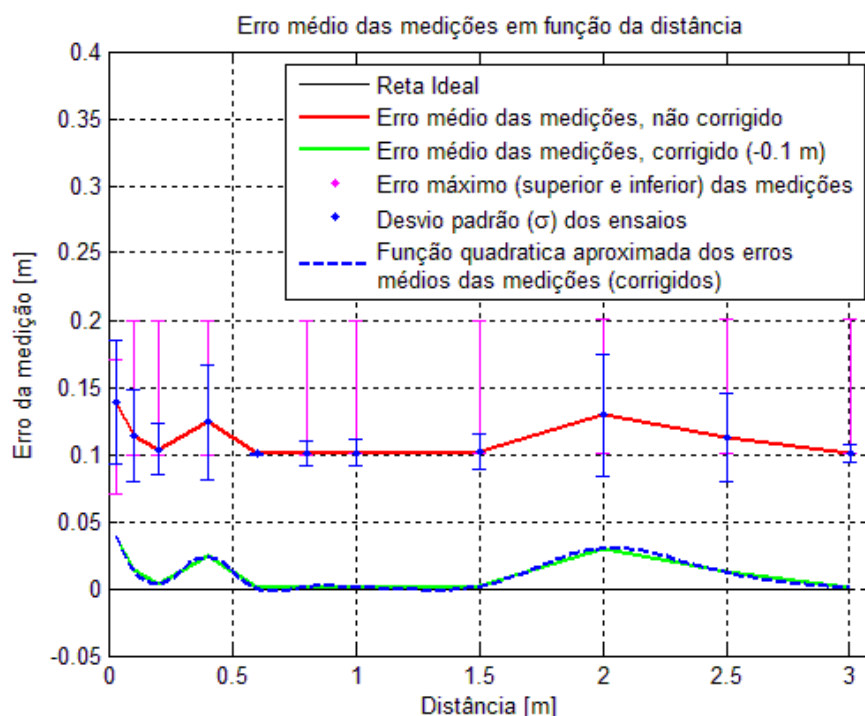


Figura 5-3 - Gráfico que apresenta o erro médio das leituras do Sensor AGL em função da distância (real) a que foram realizados os ensaios.

Ao observar Figura 5-2, é possível notar uma visível discrepância entre a média das medições realizadas pelo Sensor AGL (não corrigidas) e a reta ideal presente no gráfico. No entanto, uma vez que o desvio padrão dos vários ensaios é baixo (o seu valor mais alto é de 0,0461m para o ensaio a 0,03m de altura), há uma forte indicação de que, para além de erros aleatórios, estejam também presentes erros sistemáticos. Estes últimos erros correspondem a aqueles que são derivados da má calibração do sensor, pelo que podem ser facilmente corrigidos. Observando a Figura 5-3, é possível verificar que a média dos erros das medições recolhidas durante os ensaios (não corrigidas) têm um erro de cerca de 10cm acima do valor correto, com picos de quase 15cm em alguns ensaios. Por outro lado, uma vez que também a medição mínima registada se encontra 10cm acima do valor real em todos os ensaios (ver Tabela 5-1) e que a resolução do Sensor AGL é de 10cm, optou-se por aplicar um fator de correção de -10cm para a remoção deste erro. O resultado obtido está representado com a cor verde em ambas as Figuras 5-2 e 5-3. Tal como é constatável, os dados corrigidos encontram-se muito próximos da reta ideal, sendo que o erro máximo das medições corrigidas se encontra abaixo dos 5cm (metade da resolução do sensor).

Tabela 5-1 - Resultados obtidos nos ensaios do teste a várias distâncias em laboratório.

Distância real [m]	Média das medições [m]	Desvio Padrão [m]	Medição mínima [m]	Medição máxima [m]	Perc. de boas medições	Perc. de medições de alta resolução
0,03	0.1694	0.0461	0.1	0.2	100%	100%
0,1	0.2138	0.0345	0.2	0.3	100%	100%
0,2	0.3037	0.0189	0.3	0.4	100%	100%
0,4	0.5237	0.0425	0.5	0.6	100%	100%
0,6	0.7	0	0.7	0.7	100%	100%
0,8	0.9009	0.0094	0.9	1.0	100%	100%
1,0	1.101	0.01	1.1	1.2	100%	100%
1,5	1.6018	0.0133	1.6	1.7	100%	100%
2,0	2.1293	0.0455	2.1	2.2	100%	100%
2,5	2.6122	0.0327	2.6	2.7	100%	100%
3,0	3.1005	0.0071	3.1	3.2	100%	100%

Em relação à qualidade das medições, verificou-se um baixo desvio padrão na maioria dos ensaios, indicando uma boa precisão entre leituras recolhidas à mesma distância. Os piores resultados a este nível ocorreram nos ensaios a 3cm, a 40cm e a 2m, em que o desvio padrão atingiu valores próximos dos 5cm. Por outro lado, a diferença entre as medições máximas e mínimas em cada ensaio é de 10cm (à exceção do ensaio a 60cm), sendo igual à resolução do sensor. Todas as medições obtidas foram boas (100%) e de alta resolução (100%) mas, embora a frequência de amostragem estivesse definida para o valor máximo suportado pelo sensor (1Hz), o valor médio obtido situou-se aquém do esperado: 0,72Hz.

Em suma, as medições obtidas neste teste (quando corrigidas) revelaram-se muito próximas do valor real (boa exatidão), assumindo um baixo desvio padrão (boa precisão) e superando não só o desempenho do DGPS a nível altimétrico, mas também o anunciado pelo fabricante (+/- 30cm para leituras de alta resolução). No entanto, a frequência de amostragem média obtida situou-se próximo dos 0,72Hz, um valor abaixo do esperado. Os erros aleatórios, embora pouco influentes neste teste, podem ser atribuídos ao relógio interno do sensor, dadas as curtas distâncias que foram medidas (valores de TOF muito curtos).

5.1.2.2 Teste a longas distâncias

O teste a longas distâncias foi realizado no seguimento do teste anterior, com o objetivo de avaliar a exatidão do Sensor AGL na medição de distâncias até aos 500m. Por outro lado, e uma vez que foram detetados erros sistemáticos no teste anterior, pretendeu-se verificar se o perfil de erro verificado anteriormente se mantém ou não para estas distâncias. Uma vez que não é praticável colocar o Laser-Altímetro a estas altitudes de forma estável e assegurando que o feixe está perpendicular com o solo, a solução encontrada foi a de realizar o teste na horizontal, ou seja, com o feixe Laser paralelo ao solo. Dado que a *footprint* deste sensor assume o valor de cerca de 1,5m de diâmetro à distância de 500m, foi necessário encontrar um local que contasse com a presença simultânea de uma superfície refletora fixa (edifício) com uma área superior à da *footprint* e uma distância livre (sem obstáculos) de 500m à sua perpendicular. Por motivos logísticos, a opção escolhida foi a de realizar os testes no CFMTFA, utilizando enquanto superfície refletora a porta de um hangar e colocando o Sensor AGL nos pontos previamente marcados sobre a berma do *taxiway* (ver Figura 5-4) para a realização dos vários ensaios.



Figura 5-4 - Porta do hangar escolhida enquanto superfície refletora (esquerda) e pontos onde foi colocado o Sensor AGL para a realização dos vários ensaios para o teste (direita). (Imagem da direita obtida a partir da aplicação Google Earth)

Para este teste foram utilizadas como referências:

- A estação total *Leica TCRT 1201*, com uma exatidão de 1mm em distância e de 0,00018° em termos angulares, para a marcação das distâncias desde a porta

do hangar até aos pontos em que são realizados os ensaios, mantendo um ângulo de 90° com a superfície refletora;

- Esquadro aristo *Rotring*, aliado a um pêndulo vertical para assegurar que a face do sensor que contém as óticas está perpendicular ao solo;

Para minimizar os erros, e uma vez que as óticas do sensor poderiam estar expostas a outras fontes de radiação na banda de funcionamento do mesmo (como o Sol), optou-se pela realização do teste durante a noite. Assim, e tal como esquematizado na Figura 5-4, foram feitos um total de 8 ensaios, com o feixe Laser a 90° com a superfície refletora, às distâncias de 3m, 10m, 50m, 100m, 200m, 300m, 400m e 500m. Para cada ensaio foram recolhidas 1000 medições, de forma a constituir uma amostra estatisticamente relevante para análise, utilizando o dispositivo esquematizado na figura seguinte.

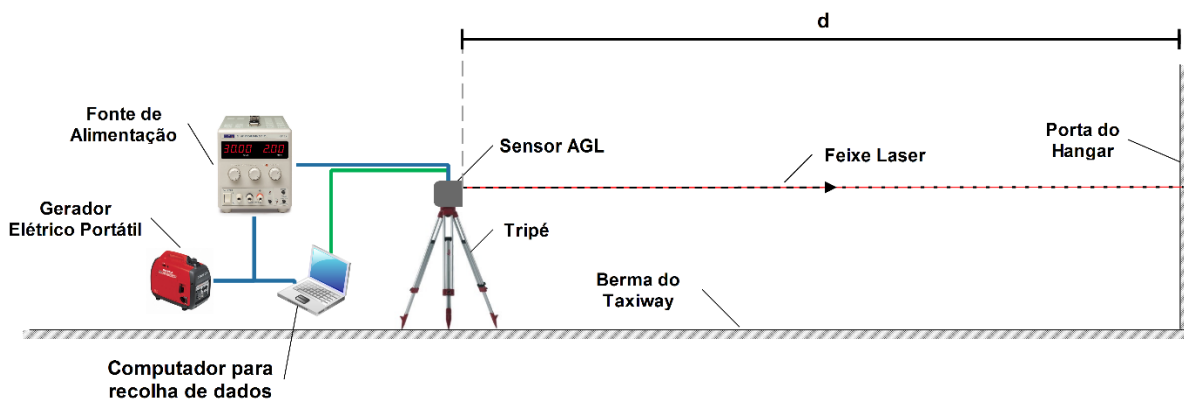


Figura 5-5 - Diagrama ilustrativo do dispositivo utilizado para os testes a grandes distâncias.

Após a realização de todos os ensaios e conseqüente recolha das medições do sensor, foi executado o *script* de pós-processamento previamente desenvolvido, obtendo-se os resultados seguidamente apresentados.

Tal como é possível observar no gráfico da Figura 5-6, embora o erro de cerca de 10cm se mantenha até aos 50m, a partir dessa distância existe um franco aumento do erro médio das medições. Na mesma figura é possível observar a «cor de laranja» as medições corrigidas com o perfil de erro anterior (-10cm), verificando-se o seu desajuste a partir dos 50m, bem como da existência de um «pico» de erro médio de mais de 20cm aos 200m (embora ainda dentro dos limites publicados pelo fabricante). Na Tabela 5-2 estão apresentados sobre a forma numérica os dados obtidos neste teste.

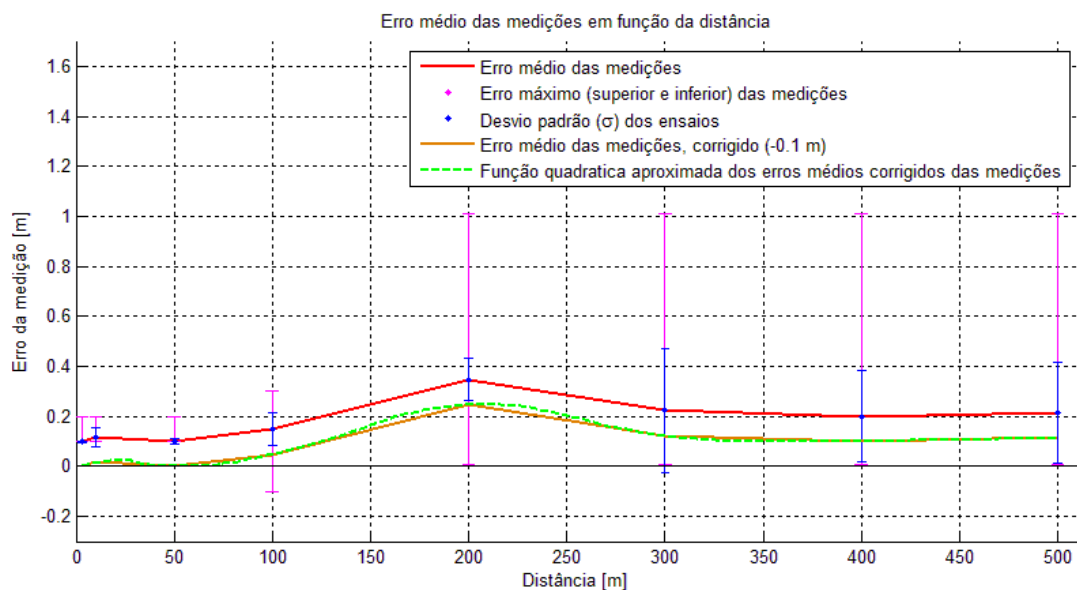


Figura 5-6 - Gráfico do erro médio das medições em função da distância a que foram realizados os testes.

Tabela 5-2 - Resultados conjuntos obtidos nos ensaios do teste a longas distâncias.

Distância real [m]	Média das medições [m]	Desvio Padrão [m]	Medição mínima [m]	Medição máxima [m]	Perc. de boas medições	Perc. de medições de alta resolução
3	3.1001	0.0032	3.1	3.2	100%	100%
10	10.1166	0.0372	10.1	10.2	100%	100%
50	50.1010	0.01	50.1	50.2	100%	100%
100	100.1486	0.0666	99.9	100.3	100%	97,6%
200	200.3482	0.0839	200	201	100%	99,3%
300	300.2238	0.2463	300	301	100%	49,6%
400	400.2009	0.1839	400	401	100%	60,7%
500	500.2146	0.2031	500	501	100%	56,3%

Relativamente à qualidade das leituras e analisando as medições máximas e mínimas registadas para cada ensaio (ver Tabela 5-2), verifica-se que a partir dos 200m a diferença entre elas é de cerca de 1m. É também notório o aumento do desvio padrão a partir dessa distância: nos ensaios até 50m é constatável um baixo desvio padrão (inferior a 5cm), aumentando nos ensaios a 100m e 200m para valores na ordem dos 6cm e 8cm respetivamente. Nos ensaios a 300m, 400m e 500m, este parâmetro aumenta drasticamente, atingindo quase 25cm no ensaio a 300m.

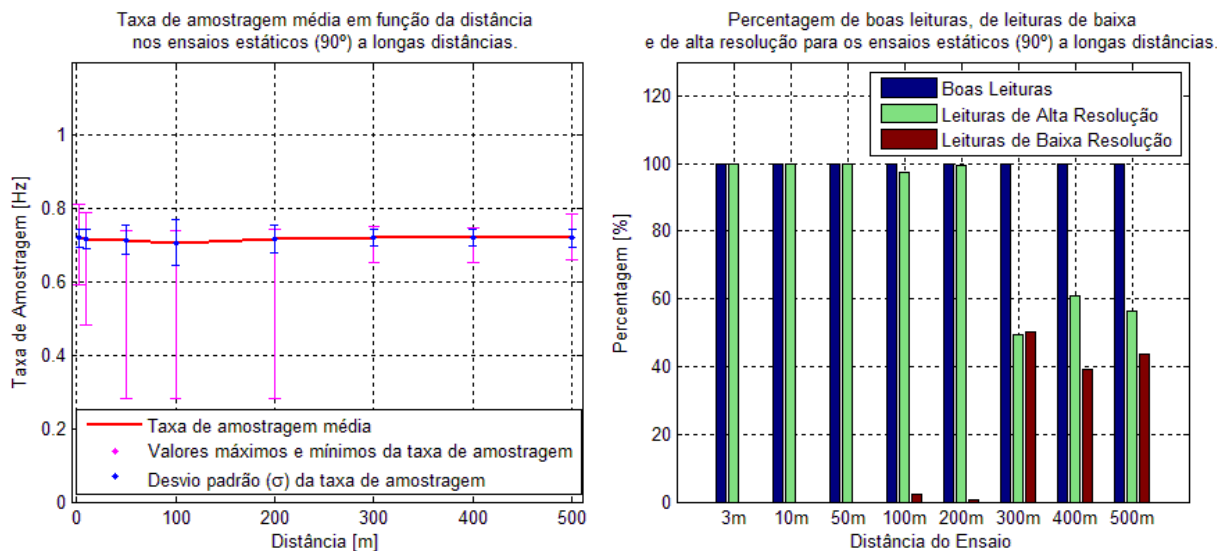


Figura 5-7 - Taxa de amostragem média verificada nos ensaios para o teste a longas distâncias (esquerda) e percentagem de boas leituras e leituras de alta e baixa resolução (direita).

A nível da taxa de amostragem do sensor, esta apresentou uma média de cerca de 0,72Hz (ver Figura 5-7), valor abaixo dos 1Hz anunciados pelo fabricante, sendo que o valor máximo registado foi de 0,81Hz no ensaio a 3m. Os valores mínimos foram de cerca de 0,28Hz e correram nos ensaios a 50m, 100m e 200m, podendo ser justificados pela hipotética presença de ruído momentâneo, acima do normal, na banda de funcionamento do sensor.

A percentagem de boas medições manteve-se em 100% para todos os ensaios mas, tal como é visível na Figura 5-7, a partir do ensaio a 100m a percentagem de medições de alta resolução foi sofrendo reduções. Dessa forma, e uma vez que o fabricante anuncia uma exatidão de +/-30cm para medições de alta resolução e de +/-1m para medições de baixa resolução, torna-se importante fazer uma análise em separado destas leituras.

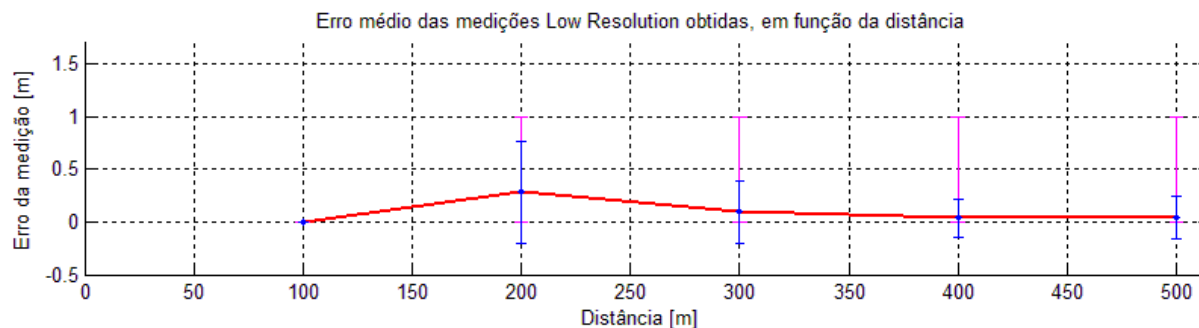


Figura 5-8 - Erro médio das medições de baixa resolução obtidas nos ensaios do teste a longas distâncias, em função da distância.

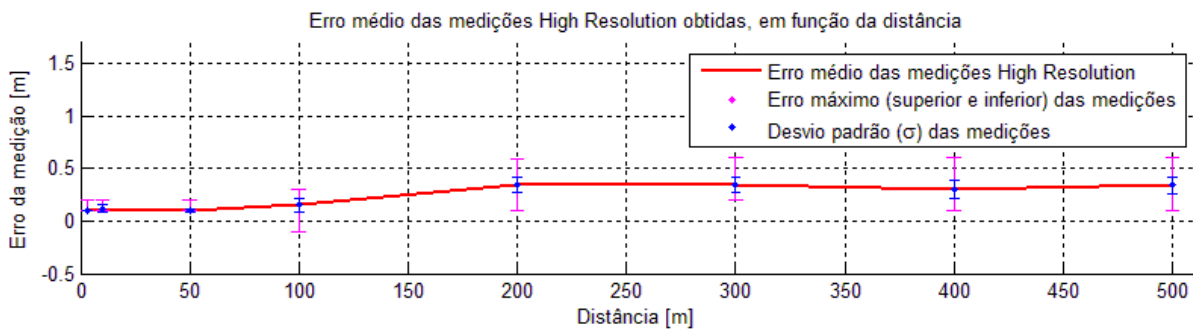


Figura 5-9 - Erro médio das medições de alta resolução obtidas nos ensaios do teste a longas distâncias, em função da distância.

Tal como é visível na Figura 5-8, apenas existem registos de medições de baixa resolução a partir do ensaio a 100m, uma vez que nos anteriores todas as medições foram de alta resolução. Comparando estes dois tipos de leituras (Figuras 5-8 e 5-9), é verificável que o erro médio das medições de baixa resolução é inferior ao das de alta resolução. No entanto, verifica-se um desvio padrão superior nas medições de baixa resolução do que no das de alta resolução, acontecendo o mesmo para o erro máximo.

No caso particular das medições de baixa resolução, dado o seu elevado desvio padrão e o facto da amplitude dos seus erros máximos ser cerca de 1m, conclui-se que há uma prevalência de erros aleatórios. Desta forma, e embora seja também visível a existência de erros sistemáticos, pelo facto da resolução destas leituras ser de +/-1m as mesmas são consideradas incorrigíveis e não se recomenda a sua utilização para operações onde sejam necessárias exatidões inferiores a 1m. No caso das medições de alta resolução, embora o erro médio seja superior às de baixa resolução, o desvio padrão e a amplitude dos erros máximos é muito inferior (ver Tabela 5-3). Neste sentido, embora seja notória a existência de erros aleatórios, existem certamente erros sistemáticos que podem ser corrigidos. Assim, de acordo com a Figura 5-9, o erro médio em função da distância é considerado como sendo perfil do erro sistemático do Sensor AGL, sendo assim possível corrigir as suas medições.

É importante realçar que, embora as leituras máximas (não corrigidas) obtidas ultrapassem os +/-30cm de exatidão anunciados pelo fabricante para medições de alta resolução, estes valores não se encontram corrigidos do erro sistemático do sensor. Por outras palavras, ao aplicar um fator de correção para corrigir este erro (o

inverso do erro médio das medições obtidas), podemos verificar que as medições máximas e mínimas corrigidas se mantêm dentro do intervalo +/-30cm do valor real.

Tabela 5-3 – Leituras de alta resolução obtidas nos ensaios do teste a longas distâncias.

Distância real [m]	Média das medições [m]	Desvio Padrão [m]	Medição mínima [m]	Medição máxima [m]
3	3.1001	0.0032	3.1	3.2
10	10.1166	0.0372	10.1	10.2
50	50.1010	0.01	50.1	50.2
100	100.1520	0.0637	99.9	100.3
200	200.3485	0.075	200.1	200.6
300	300.3423	0.0718	300.2	300.6
400	400.3015	0.0878	400.1	400.6
500	500.3414	0.076	500.1	500.6

Em suma, os resultados obtidos neste teste mostraram-se influenciados tanto por erros sistemáticos como por erros aleatórios. A nível dos erros aleatórios, considera-se que a atenuação atmosférica, a sensibilidade do recetor do Sensor AGL, a hipotética existência de ruído e eventuais variações nas medições do TOF terão sido os maiores fatores geradores deste tipo de erros. As leituras de baixa resolução, fruto também das causas acima descritas para os erros aleatórios, não são consideradas utilizáveis em operações que exijam uma exatidão melhor que +/-1m, dada a amplitude do seu erro e a sua resolução. Os erros sistemáticos, não sendo ajustada a correção determinada no teste anterior para distâncias superiores a 50m (-10cm), poderão ser corrigidos a partir do erro médio das medições em função da distância real, verificados neste teste. Após a correção, é possível verificar que todas as leituras registadas se encontram dentro do intervalo anunciado pelo fabricante para leituras de alta resolução (+/-30cm) tendo, conseqüentemente, um desempenho superior ao DGPS. A partir dos ensaios a 100m é também visível um aumento do desvio padrão que é justificado pelos erros aleatórios acima referidos. Por fim, à semelhança do teste anterior, a taxa de amostragem verificada nos ensaios ficou aquém da anunciada pelo fabricante, sendo 0,72Hz a taxa obtida face à taxa anunciada de 1Hz.

5.1.2.3 Teste em várias superfícies

Tal como já referido no Capítulo 3, o desempenho de um Laser-Altímetro está condicionado pela refletividade da superfície em direção à qual está a ser emitido o feixe. Desta forma, o teste em várias superfícies foi realizado com o objetivo de avaliar o desempenho do Sensor AGL na medição da altitude face aos tipos de solo mais comuns num aeródromo: asfalto e vegetação baixa (ver Figura 5-10). Neste mesmo sentido, pretendeu-se também verificar a existência ou não de limitações a nível das superfícies sobre as quais este sensor poderá operar.



Figura 5-10 - Tipos de superfície em que foram realizados os testes: asfalto (esquerda) e vegetação (direita).

Este teste foi realizado durante o dia, de acordo com o dispositivo apresentado na Figura 5-1 (página 69), com o sensor a uma altura de 1,1m do solo e com o feixe Laser a incidir perpendicularmente à superfície (90°). Foram realizados um total de 4 ensaios em 4 tipos de superfícies distintas, recolhendo 600 leituras em cada um deles. Os tipos de superfície escolhidos foram: vegetação baixa (relva com cerca de 3cm de altura), asfalto seco, asfalto molhado e asfalto coberto com uma camada de água de cerca de 1,5mm.

Para a realização dos ensaios foram utilizadas as seguintes referências:

- Fita métrica *Stanley* de 3 metros com classe de exatidão II para a medição da distância entre o sensor e a superfície refletora;
- Esquadro aristo *Rotring*, aliado a um pêndulo vertical para medição do ângulo de incidência do feixe em relação à superfície;

Após a recolha das medições foi executado o *script* de pós-processamento, obtendo-se os seguintes resultados.

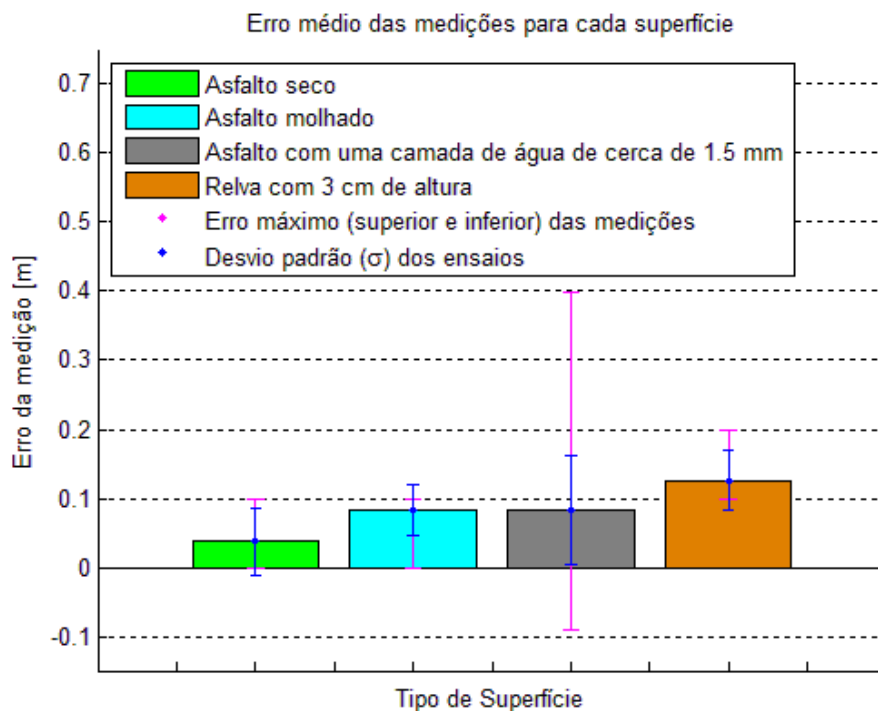


Figura 5-11 - Erro médio obtido nos ensaios do teste em várias superfícies.

Tabela 5-4 - Resultados obtidos nos ensaios do teste em várias superfícies.

Superfície	Média das medições [m]	Desvio Padrão [m]	Medição mínima [m]	Medição máxima [m]	Perc. de boas medições	Perc. de medições de alta resolução
Asfalto Seco	1.1380	0.0486	1.1	1.2	100%	100%
Asfalto molhado	1.1833	0.0373	1.1	1.2	100%	100%
Asfalto com camada de água	1.1825	0.0786	1.0	1.5	100%	99,83%
Vegetação	1.2260	0.0439	1.2	1.3	100%	100%

Tal como é visível na Figura 5-11, a superfície que obteve o menor erro médio foi o asfalto seco, seguido do asfalto com uma camada de água, do asfalto molhado e da vegetação. Nas 3 últimas superfícies mencionadas é visível o erro sistemático de 10cm, sendo que o mesmo não acontece de forma tão pronunciada para o asfalto seco. Tal pode ser explicado pelo facto dos testes terem sido realizados durante o dia e no exterior: uma vez que o sol também emite radiação infravermelha, o aumento do ruído poderá ter levado a um aumento dos erros aleatórios que poderão ter influenciado as medições. Estes mesmos erros, aliados à irregularidade das superfícies, justificam também o aumento do desvio padrão dos ensaios, face ao desvio padrão do ensaio a 1 metro no teste em laboratório (valor de 0,01m). A nível

dos erros máximos, os valores obtidos foram semelhantes aos do teste em laboratório à distância de 1 metro, exceto para a superfície de asfalto com uma camada de água que teve os piores resultados. No entanto, aplicando o fator de correção anteriormente determinado para esta distância (-10cm), verifica-se que todas as medições se encontram dentro da margem anunciada pelo fabricante.

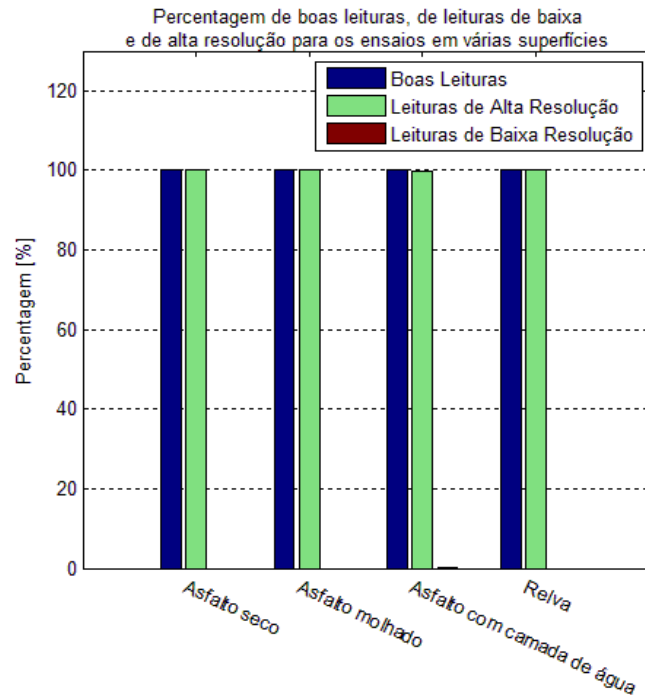


Figura 5-12 - Percentagem de boas leituras e das leituras de alta e baixa resolução para os ensaios realizados do teste em várias superfícies.

Tal como é constatável na Figura 5-12, todas as leituras de todos os ensaios foram boas, sendo que, à exceção do ensaio na superfície de asfalto com uma camada de água, todas as leituras foram de alta resolução.

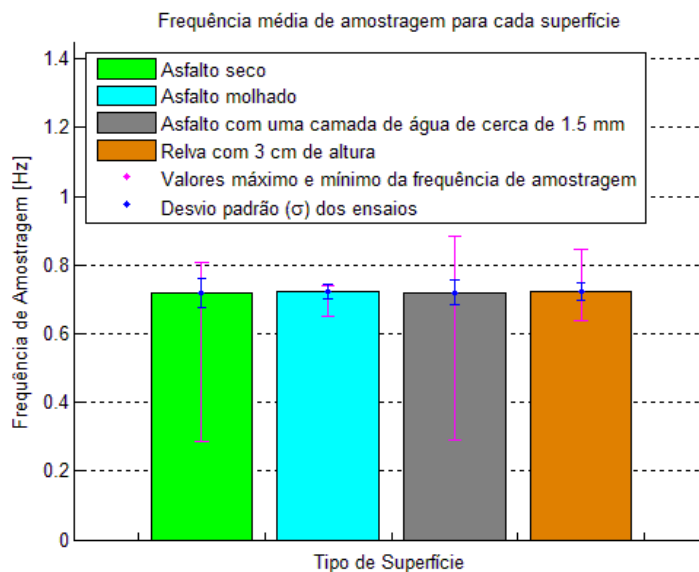


Figura 5-13 - A frequência de amostragem obtida para cada um dos ensaios do teste em várias superfícies.

A nível da frequência de amostragem, o valor médio obtido durante os ensaios manteve-se em cerca de 0,72Hz, estando novamente abaixo do valor anunciado pela *Latitude Engineering*. Nos ensaios realizados sobre asfalto seco e asfalto com uma camada de água, os valores mínimos obtidos rondam os 0,29Hz. Estima-se que na origem destes valores baixos esteja o surgimento de ruído momentâneo que dificultou pontualmente a determinação da altitude por parte do Sensor AGL.

Em suma, o desempenho do Sensor AGL, neste teste, mostrou-se dentro dos parâmetros anunciados pelo fabricante (à exceção da taxa de amostragem), demonstrando assim melhor exatidão a nível altimétrico do que o DGPS. A partir dos ensaios realizados, não foi encontrada nenhuma limitação em termos de superfícies em que este não deva operar. No entanto, recomenda-se cautela aquando da operação sobre piso muito molhado, pois é espetável a deterioração da qualidade das leituras do sensor devido à má reflexão do feixe por parte da água (páginas 31 e 32).

5.1.2.4 Testes com vários ângulos de incidência

Os testes com vários ângulos de incidência têm por objetivo avaliar a capacidade do Sensor AGL em medir a altitude corretamente e consistentemente, em situações em que o feixe Laser não se encontre perpendicular com a superfície em que incide. Tais situações poderão ser consequência de uma atitude de subida ou descida, de pranchamento, ou de ambos por parte da plataforma UAV, como também resultado do sobrevoo de terreno com relevo mais acentuado. Neste sentido, foram realizados dois testes: um em laboratório a 3 metros de distância e outro no exterior a 50m de distância. Por motivos logísticos, estes testes foram realizados na horizontal, ou seja, com o feixe Laser paralelo ao solo. É de importante realce que o ângulo de incidência considerado nestes testes corresponde ao ângulo entre o feixe Laser e a reta normal (imaginária) da superfície refletora.

5.1.2.4.1 Teste a 3 metros

Este teste foi realizado no interior com o Sensor AGL fixo a 3 metros de uma superfície refletora previamente escolhida (ver Figura 5-14). Esta superfície, de acordo com o ensaio a realizar, assume o ângulo necessário para que o ângulo de incidência do feixe Laser seja de 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 85°. Desta forma foram realizados um total de 7 ensaios, recolhendo 1000 medições em cada um deles.

As referências utilizadas para este teste foram:

- Uma fita métrica *Stanley* de 3 metros com classe de exatidão II, para a medição da distância de 3 metros entre o sensor e a superfície refletora;
- Um esquadro aristo *Rotring* para medição do ângulo da superfície refletora;

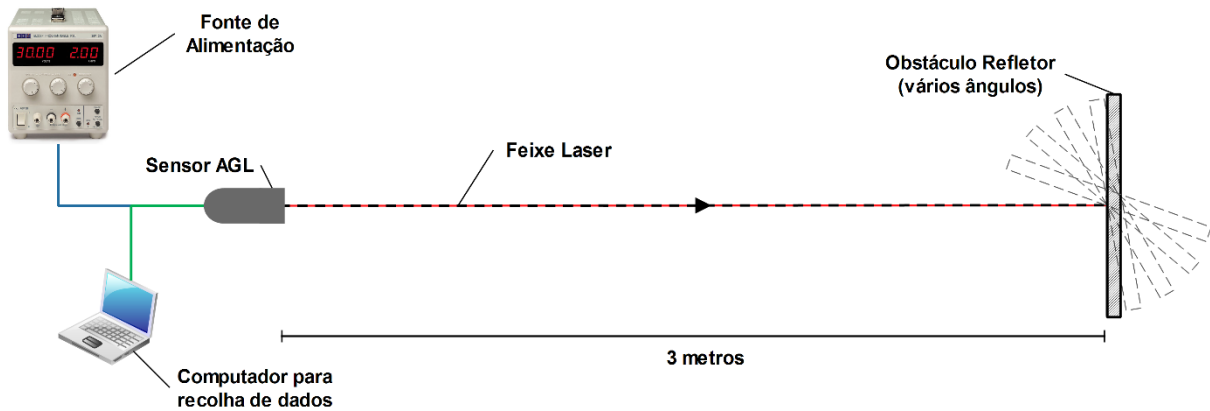


Figura 5-14 - Diagrama ilustrativo do dispositivo utilizado para os ensaios do teste a 3 metros a para vários ângulos de incidência em laboratório.

Após a execução do respetivo script de pós-processamento, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 5-5. Na Figura 5-15 encontra-se representando o erro médio das leituras em função do ângulo de incidência e, tal como é possível observar, este mantém-se próximo do valor de 10cm acima do valor real (erro sistemático já verificado nos testes anteriores) até um ângulo de incidência de 75°. Como tal, aplicou-se o fator de correção determinado anteriormente (-10cm), verificando-se a anulação dos erros obtidos nos ensaios até um ângulo de incidência de 75° (a verde na Figura 5-15).

Tabela 5-5 - Resultados obtidos nos ensaios do teste em laboratório a 3 metros para vários ângulos de incidência.

Ângulo de Incidência [°]	Média das medições [m]	Desvio Padrão [m]	Medição mínima [m]	Medição máxima [m]	Perc. de boas medições	Perc. de medições de alta resolução
0	3.1002	0.0063	3.0	3.2	100%	100%
15	3.1042	0.0201	3.1	3.2	100%	100%
30	3.1028	0.0165	3.1	3.2	100%	100%
45	3.1086	0.0281	3.1	3.2	100%	100%
60	3.1008	0.0089	3.1	3.2	100%	100%
75	3.1035	0.0184	3.1	3.2	100%	100%
85	3.2911	0.0285	3.2	3.3	100%	100%

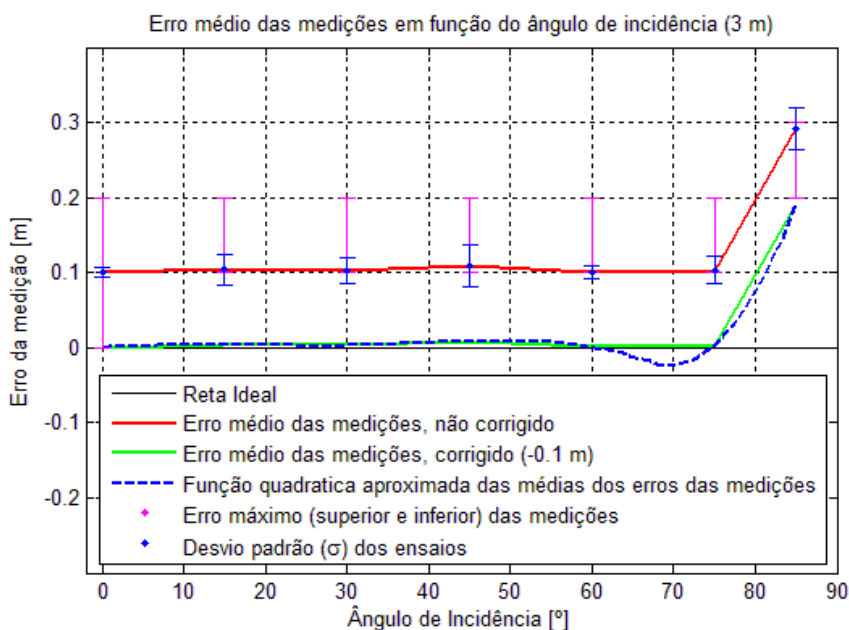


Figura 5-15 - Gráfico com o erro médio das medições obtidas no teste para vários ângulos de incidência, em função do ângulo de incidência.

No ensaio para um ângulo de incidência de 85° verificou-se um súbito aumento do erro médio (corrigido) para cerca de 20cm. Estima-se que uma das possíveis causas para este pico de erro tenha sido a «profundidade» da *footprint*, ou seja, a distância entre o ponto mais próximo e mais distante da *footprint* (ver Figura 5-16). Sendo a divergência deste sensor 3mrad, a uma distância de 3 metros o diâmetro da *footprint* assume o valor de cerca de 9mm. Uma vez que o ângulo de incidência é de 85°, a superfície refletora faz um ângulo de 5° com o feixe Laser. Assim, estando-se na presença de um triângulo retângulo e aplicando a fórmula da tangente, é possível determinar que a «profundidade» da *footprint* é de cerca de 10cm (valor não desprezável). Uma vez que o Sensor AGL se encontra configurado para o modo de alvo mais distante (*farthest target mode*), tendo em conta a sua resolução de 10cm e a dificuldade sentida durante os ensaios em direcionar perfeitamente o feixe Laser para o ponto pretendido (dado que é invisível a olho nu), é possível justificar o pico de erro obtido.

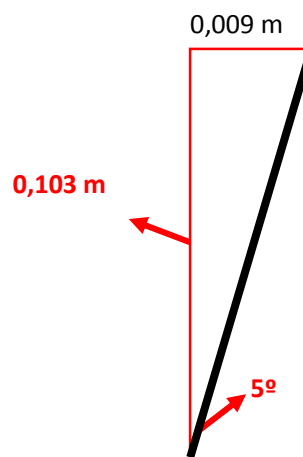


Figura 5-16 - Diagrama explicativo da profundidade da footprint para o ensaio a 85° a 3 metros de distância.

O desvio padrão determinado para os vários ensaios foi inferior a 3cm, sendo que a amplitude máxima dos erros se situou nos 10cm, à exceção da verificada no

ensaio com 0° de incidência (20cm). As visíveis variações irregulares do desvio padrão em função do ângulo de incidência (ver Figura 5-15) podem ser explicadas pelo facto da reflexão da superfície não ser perfeitamente difusa (não refletir igualmente em todas as direções).

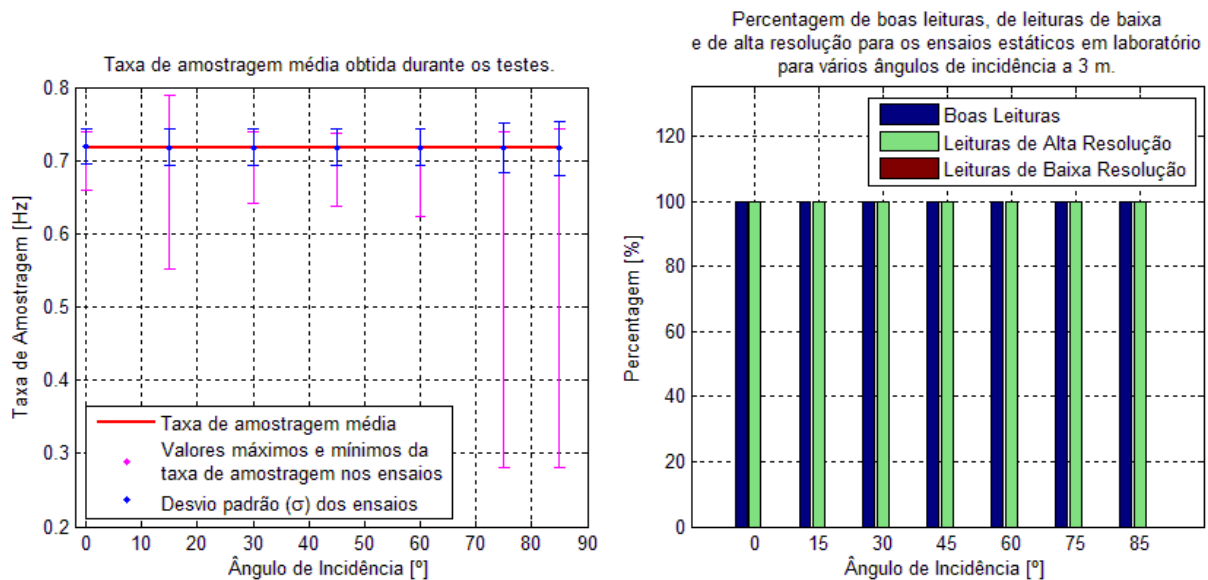


Figura 5-17 - Taxa de amostragem média verificada nos ensaios para o teste a 3 metros em laboratório para vários ângulos de incidência (esquerda) e percentagem de boas leituras e leituras de alta e baixa resolução (direita).

A Figura 5-17 mostra que todas as leituras obtidas em todos os ensaios foram boas e de alta resolução, sendo que a taxa de amostragem média manteve-se nos 0,72Hz, nunca ultrapassando o valor de 0,8Hz. Nos ensaios com o ângulo de incidência de 75° e 85° é notória uma taxa de amostragem mínima na ordem dos 0,3Hz que, aliada a valores do desvio padrão da taxa de amostragem comparativamente mais elevados, indicam alguma dificuldade por parte do sensor em realizar estas medições.

Em suma, para ângulos de incidência inferiores a 75° e à distância de 3 metros, o fator de correção determinado anteriormente é ajustado, mantendo o sensor uma boa precisão e exatidão das leituras (quando corrigidas), e superando a exatidão do sistema DGPS. Neste teste o Sensor AGL demonstrou um desempenho dentro do esperado para todos os ângulos testados, exceto nos valores obtidos da taxa de amostragem. No entanto, não se recomenda o voo prolongado com este sensor em atitudes de nariz e pranchamento que resultem em ângulos de incidência superiores a 60°, dados os valores mínimos da taxa de amostragem verificados para os ensaios a 75° e 85°.

5.1.2.4.2 Teste a 50 metros

Para o teste com vários ângulos de incidência a 50 metros, foi necessária a escolha de um local suficientemente amplo para a realização do mesmo. A solução encontrada foi a utilização do parque de estacionamento em frente a um dos hangares no CFMTFA (ver Figura 5-18), utilizando enquanto superfície refletora a parede branca do próprio hangar. Dada a necessidade de realizar o teste com o feixe Laser paralelo ao solo, com o intuito de evitar o ruído derivado do Sol realizaram-se os ensaios no período noturno.



Figura 5-18 - Pontos a partir dos quais foram realizadas as medições nos ensaios a 50m para vários ângulos de incidência. (Imagem obtida a partir da aplicação Google Earth)

Para este teste foi realizado um total de 6 ensaios para os ângulos de incidência de 0° , 15° , 30° , 45° , 60° e 75° , recolhendo 500 leituras para cada um deles. O diagrama presente na Figura 5-19 ilustra o dispositivo utilizado para os ensaios deste teste.

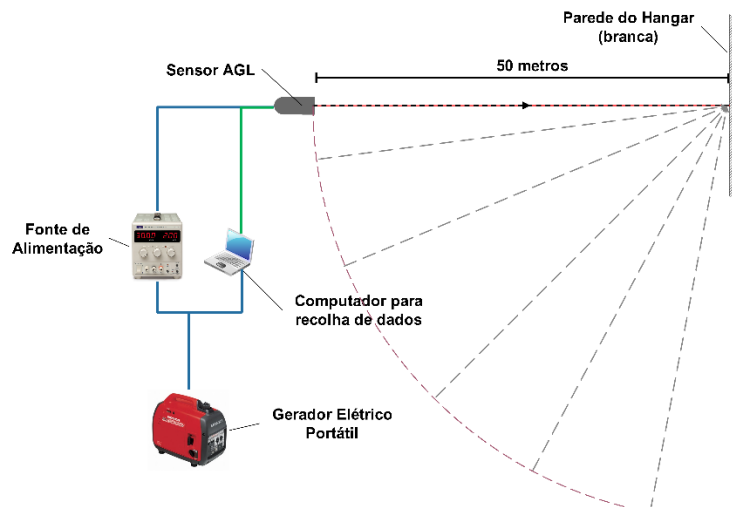


Figura 5-19 - Diagrama ilustrativo do dispositivo utilizado para os ensaios do teste para vários ângulos de incidência a 50 metros.

Para este teste foram utilizadas como referências:

- A estação total *Leica TCRT 1201* para a marcação dos pontos onde são realizadas as medições, no ângulo correto e à distância de 50 metros;
- Esquadro aristo *Rotring*, aliado a um pêndulo vertical para assegurar que a face do sensor que contém as óticas se encontra perpendicular ao solo;

Após a recolha das medições dos diversos ensaios foi executado o *script* de pós-processamento, obtendo-se os resultados seguidamente apresentados.

Na Figura 5-20 encontra-se representado o erro médio das medições obtidas em função do ângulo de incidência do ensaio. Para os ângulos de incidência de 0° e 15° é visível um erro estável de 10cm acima do valor correto. Este erro, já identificado anteriormente como sistemático, pode ser corrigido através da aplicação do fator de correção determinado (-10cm). Assim, o erro médio corrigido pode ser observado a verde na mesma figura, assumindo um valor próximo de 0 para os ângulos acima referidos.

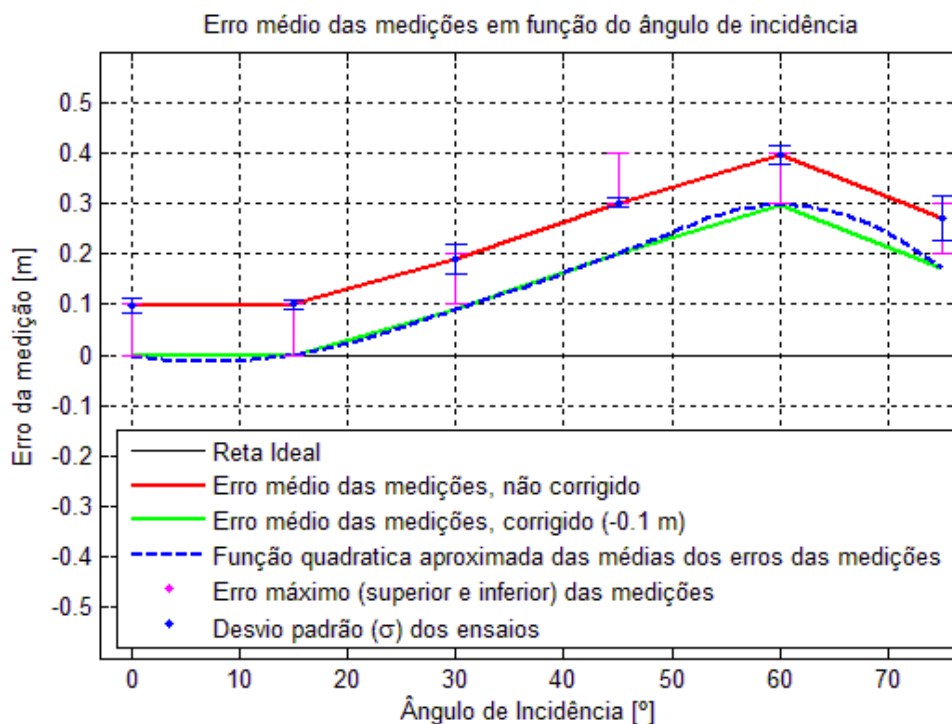


Figura 5-20 - Erro médio das medições obtidas no teste a 50 metros para vários ângulos de incidência, em função do ângulo de incidência.

A partir dos ângulos de incidência de 30° é visível um contínuo aumento do erro com o aumento do ângulo de incidência. Presume-se que tal aconteça devido à «profundidade» da *footprint*, situação explicada no teste anterior, que deixa de ser

desprezável. No caso particular deste teste, verifica-se que este fenómeno ocorre a ângulos de incidência mais baixos devido á maior dimensão da *footprint*. Aliada a esta situação, também contribuíram para este resultado o facto do Sensor AGL se encontrar configurado para o modo de alvo mais distante (*farthest target mode*), o facto de a sua resolução ser de 10cm e também a dificuldade sentida em direcionar perfeitamente o feixe Laser para o ponto prendido durante os ensaios (dado que este é invisível a olho nu).

No caso do ensaio para o ângulo de incidência de 75° é verificável uma redução relativa do erro médio das medições. Presume-se que tal ocorreu, por um lado, devido à atenuação ou má reflexão da parte mais distante da *footprint* e, por outro, devido à dificuldade sentida em direcionar perfeitamente o feixe Laser para o ponto prendido, o que poderá ter levado à leitura de um ponto ligeiramente mais próximo do sensor.

De acordo com a Tabela 5-6, os valores do desvio padrão obtidos para todos os ensaios são considerados baixos, sendo o seu máximo de cerca de 4,6cm para o ensaio com o ângulo de incidência de 75°. De forma semelhante ao teste anterior, são também visíveis oscilações irregulares do valor do desvio padrão em função do ângulo de incidência, presumindo-se que se deva ao facto de as superfícies não refletirem igualmente em todas as direções.

Tabela 5-6 - Resultados obtidos nos ensaios do teste a 50 metros para vários ângulos de incidência.

Ângulo de Incidência [°]	Média das medições [m]	Desvio Padrão [m]	Medição mínima [m]	Medição máxima [m]	Perc. de boas medições	Perc. de medições de alta resolução
0	50.0978	0.0147	50.0	50.1	100%	100%
15	50.0994	0.0077	50.0	50.1	100%	100%
30	50.1894	0.0308	50.1	50.2	100%	100%
45	50.3010	0.01	50.3	50.4	100%	100%
60	50.3960	0.0196	50.3	50.4	100%	100%
75	50.2708	0.0455	50.2	50.3	100%	100%

A nível da qualidade das leituras, todas as medições registadas foram boas e de alta resolução, verificando-se também uma boa precisão por parte do sensor, dado que a amplitude dos erros máximos (superior e inferior) é de 10cm.

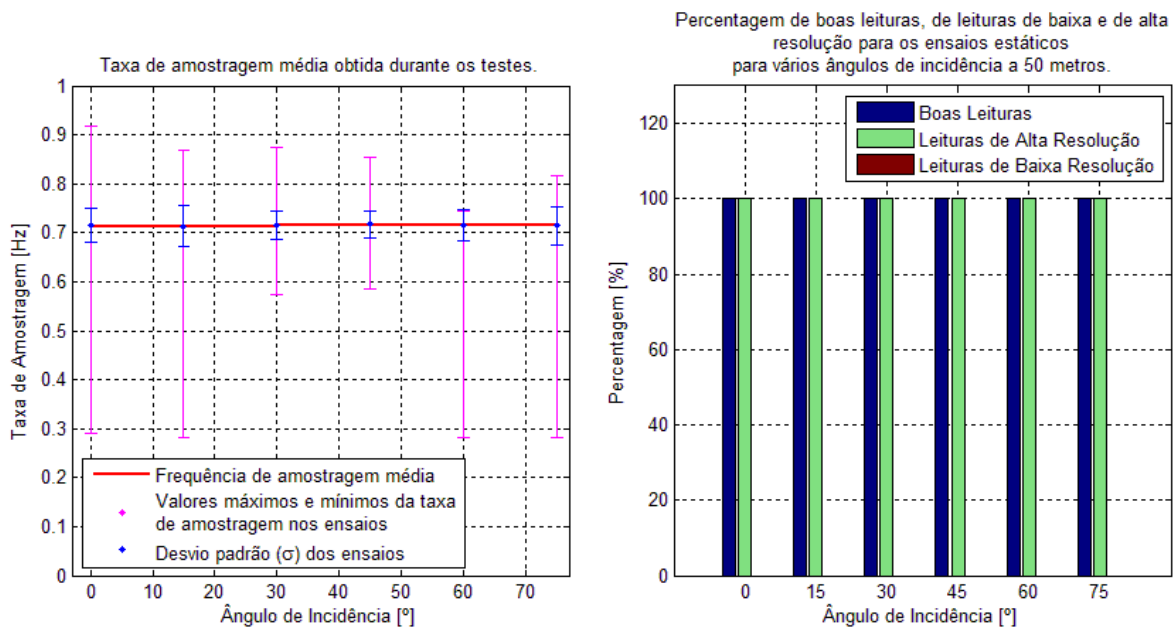


Figura 5-21 - Taxa de amostragem média verificada nos ensaios para o teste a 50 metros para vários ângulos de incidência (esquerda) e a percentagem de boas leituras e leituras de alta e baixa resolução (direita).

A nível da taxa de amostragem média, esta manteve-se no valor de cerca de 0,72Hz, sendo o seu valor máximo registado de 0,92Hz para o ensaio com 0° de ângulo de incidência. As taxas de amostragem mais baixas foram registadas para os ensaios com 0°, 15°, 60° e 75° de ângulo de incidência com valores de cerca de 0,28Hz.

Em suma, os resultados obtidos para os ensaios com 0° e 15° de ângulo de incidência superam os valores anunciados pelo fabricante e o valor de referência do DGPS, mostrando uma boa precisão e exatidão (quando corrigidos) por parte do sensor. No entanto, a partir do ângulo de incidência de 30°, o erro aumenta progressivamente, podendo-se tornar irregular como acontece no ensaio a 75° (impossibilitando uma possível correção). Desta forma, a operação deste sensor a altitudes iguais ou superiores a 50m com atitudes de nariz e pranchamento que levem a que o ângulo de incidência seja superior a 20°, podem levar à determinação incorreta da altitude AGL.

5.1.3 Testes em Movimento

Os testes em movimento têm por objetivo a análise do desempenho do Sensor AGL, em termos de precisão e exatidão, na realização de medições de altitude a diversas velocidades. Este tipo de testes permite verificar, antes da realização do teste em voo, se a velocidade em relação ao solo influencia a qualidade das leituras, bem como se existe alguma limitação do sensor a esse nível. Para tal, foi escolhida para

este teste uma amplitude de velocidades que inclui as velocidades máximas e mínimas de voo do UAV *Alfa-Extended 00*, plataforma em que será realizado o teste em voo: entre 18m/s (64,8km/h) e 23m/s (82,8km/h). Neste sentido, foram realizados testes em dois dos tipos de pisos mais comuns num aeródromo: asfalto e vegetação baixa (relva). Para cada um deles foram feitos um total de 4 ensaios às velocidades de 30km/h, 50km/h, 70km/h e 90km/h, recolhendo-se 60 leituras para cada um deles (o número de amostras foi limitado por motivos logísticos).

O dispositivo utilizado para os testes consistiu na utilização de um tubo de alumínio fixo a uma viatura do CIAFA, com o Sensor AGL na sua extremidade e com o seu feixe devidamente alinhado e paralelo à normal da superfície, a uma altura de 2,4m (ver Figura 5-21). O tubo de alumínio permitiu realizar os ensaios sobre os dois pisos acima indicados, sem que, para tal, a viatura utilizada tivesse de sair da pista. No interior do veículo instalou-se a fonte de alimentação para alimentar o sensor, o computador para recolha de dados e um gerador elétrico portátil para alimentação destes dois últimos equipamentos.



Figura 5-22 - Dispositivo utilizado para a realização dos testes em movimento no solo.

Neste teste foram utilizadas como referências:

- Uma fita métrica *Stanley* de 3 metros com classe de exatidão II, para a medição da distância entre o sensor e o solo;
- O velocímetro da viatura utilizada para verificação da velocidade do ensaio;

Após a realização dos testes e consecutiva recolha de dados, foi executado o *script* de pós-processamento anteriormente desenvolvido, obtendo-se os resultados seguidamente apresentados.

5.1.3.1 Teste em asfalto

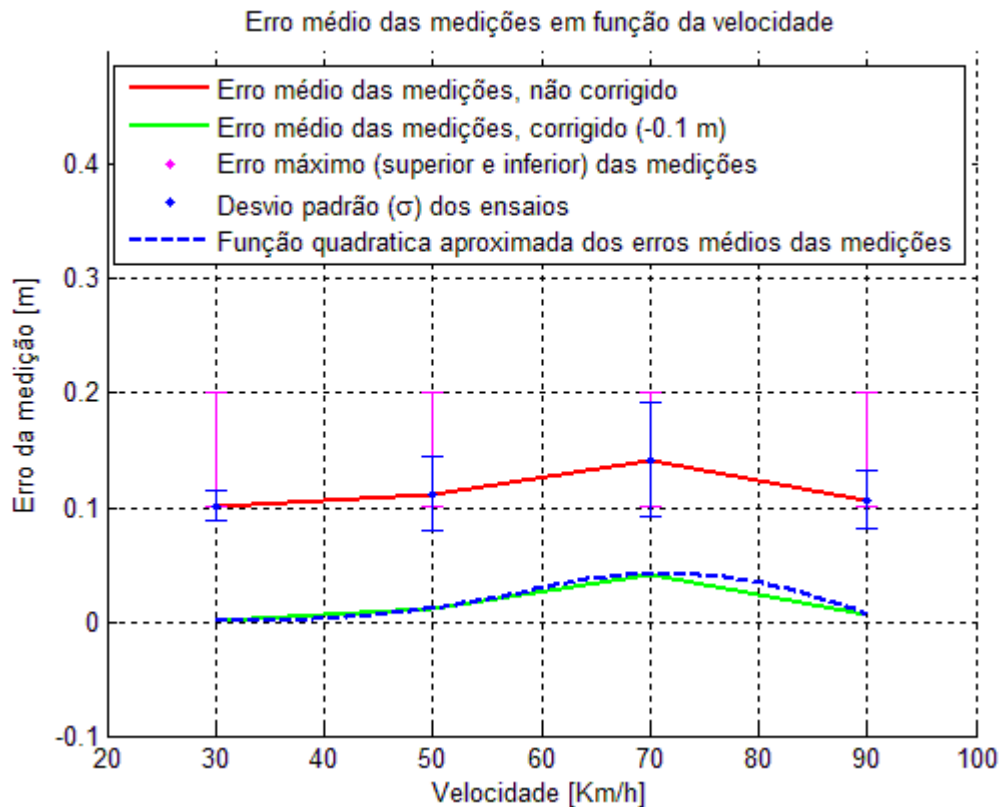


Figura 5-23 - Erro médio das leituras obtidas nos ensaios em asfalto, em função da velocidade.

Tal como é possível observar na Figura 5-23 e pelos valores da Tabela 5-7, o erro médio das medições para as velocidades de 30km/h, 50 km/h e 90km/h manteve-se próximo dos 10cm acima do valor real, erro já identificado em testes anteriores e considerado sistemático. Desta forma, aplicando o fator de correção anteriormente determinado (-10cm), obtêm-se os dados presentes na Figura 5-23 com a cor verde, e verifica-se que o erro dos mesmos é próximo de zero (boa exatidão). O desvio padrão verificado nestes ensaios é considerado baixo (boa precisão), sendo que a amplitude dos erros máximos foi de 10cm.

Para o ensaio a 70 km/h verifica-se um erro médio ligeiramente superior ao dos outros ensaios, próximo dos 15cm, apresentando também um desvio padrão ligeiramente superior. Presumem-se que na origem destes erros estejam as vibrações a que o sensor esteve sujeito durante o teste, que se mostraram irregulares ao longo

dos vários ensaios. No entanto, a amplitude dos erros máximos neste ensaio foi de 10cm, tal como nos anteriores.

Tabela 5-7 - Resultados obtidos nos ensaios em asfalto para várias velocidades.

Velocidade [km/h]	Média das medições [m]	Desvio Padrão [m]	Medição mínima [m]	Medição máxima [m]	Perc. de boas medições	Perc. de medições de alta resolução
30	2.5017	0.0129	2.5	2.6	100%	100%
50	2.5117	0.0324	2.5	2.6	100%	100%
70	2.5417	0.0497	2.5	2.6	100%	100%
90	2.5067	0.0252	2.5	2.6	100%	100%

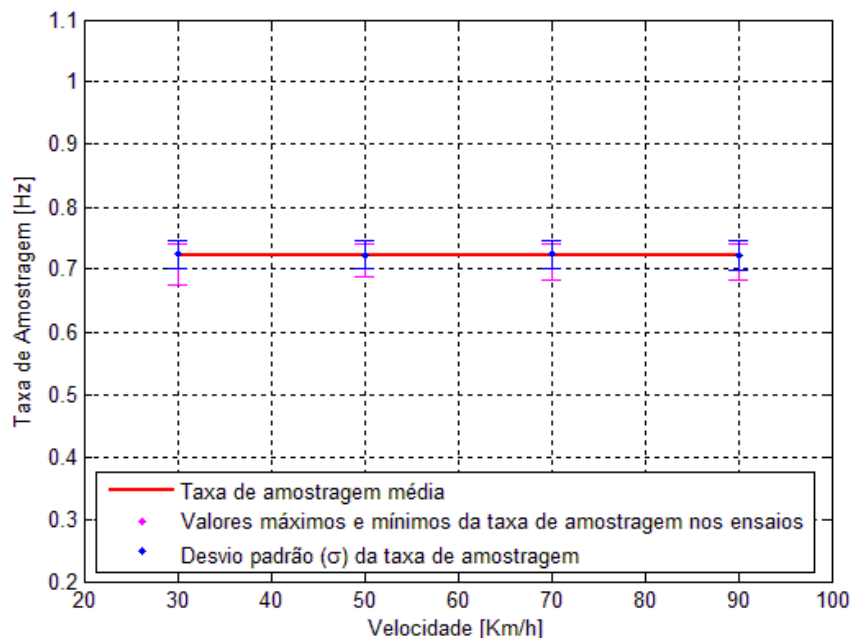


Figura 5-24 - A frequência de amostragem média obtida durante os ensaios em asfalto, em função da distância.

Em termos da taxa de amostragem, tal como é visível na Figura 5-24, esta manteve-se no valor de cerca de 0,72Hz em todos os ensaios, situando-se novamente abaixo do valor anunciado pelo fabricante. Todas as medições recolhidas foram boas e de alta resolução.

Em suma, para a superfície de asfalto, considera-se que não há variações significativas na qualidade das medições obtidas em função da velocidade, sendo que o fator de correção do erro sistemático determinado anteriormente se mostra ajustado. O Sensor AGL demonstrou durante o teste boa precisão e exatidão, superando o valor

de referência para o DGPS, embora a taxa de amostragem média se tenha mantido abaixo do valor anunciado pelo fabricante.

5.1.3.2 Teste em vegetação

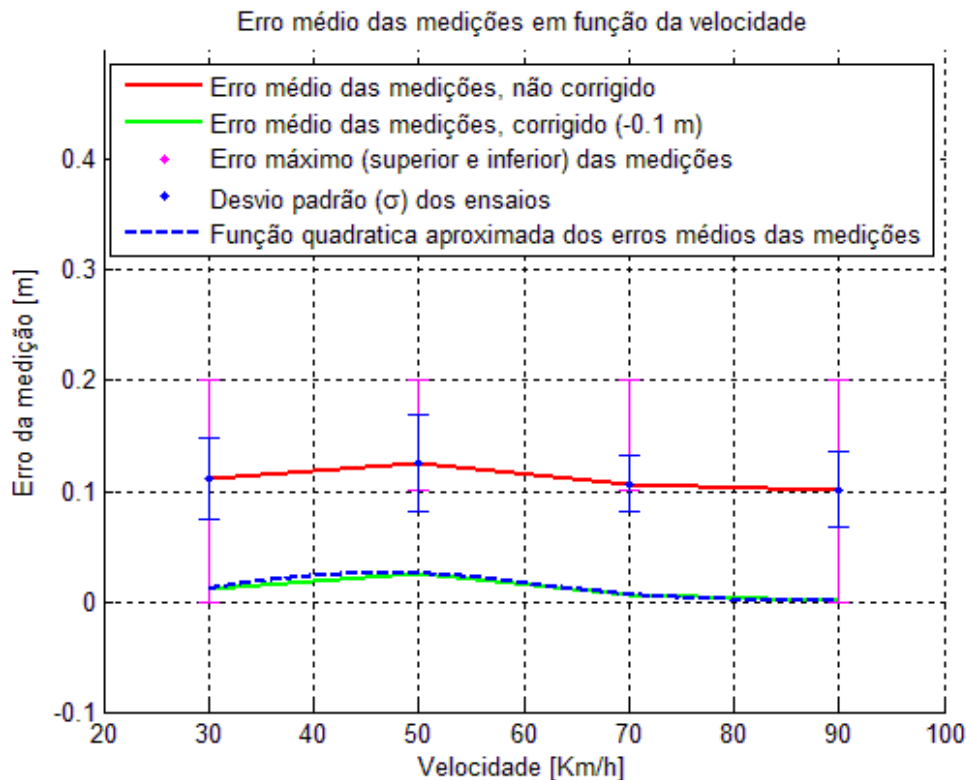


Figura 5-25 - Erro médio das leituras obtidas nos ensaios sobre vegetação, em função da velocidade.

Tabela 5-8 - Resultados obtidos nos ensaios em asfalto para várias velocidades.

Velocidade [km/h]	Média das medições [m]	Desvio Padrão [m]	Medição mínima [m]	Medição máxima [m]	Perc. de boas medições	Perc. de medições de alta resolução
30	2.5117	0.0372	2.4	2.6	100%	100%
50	2.5250	0.0437	2.5	2.6	100%	100%
70	2.5067	0.0252	2.5	2.6	100%	100%
90	2.5017	0.0344	2.4	2.6	100%	100%

Na Figura 5-25 é possível constatar que o erro médio para os ensaios a 70km/h e 90km/h se mantém próximo do valor de 10cm acima da distância real, sendo que para os ensaios a 30km/h e 50km/h o erro médio é ligeiramente superior a esse valor. Estes valores de erro acima dos 10cm podem ser justificados, à semelhança do teste anterior, pelas vibrações irregulares a que o sensor esteve sujeito durante o teste.

Assim, e uma vez que foi identificado em testes anteriores que o erro de 10cm é sistemático, aplicando o respetivo fator de correção (-10cm) obtém-se o gráfico verde presente na Figura 5-25. Tal como é possível observar, o fator de correção é ajustado, sendo que para os dois últimos ensaios o erro médio corrigido é muito próximo de 0 (boa exatidão).

O desvio padrão obtido nos ensaios é considerado baixo (boa precisão), não sendo notada nenhuma tendência de degradação com o aumento da velocidade do teste. A amplitude dos erros máximos situou-se nos 10cm para os ensaios a 50km/h e 70km/h, sendo de 20cm para os ensaios a 30km/h e 90km/h. Todas as medições recolhidas foram boas e de alta resolução.

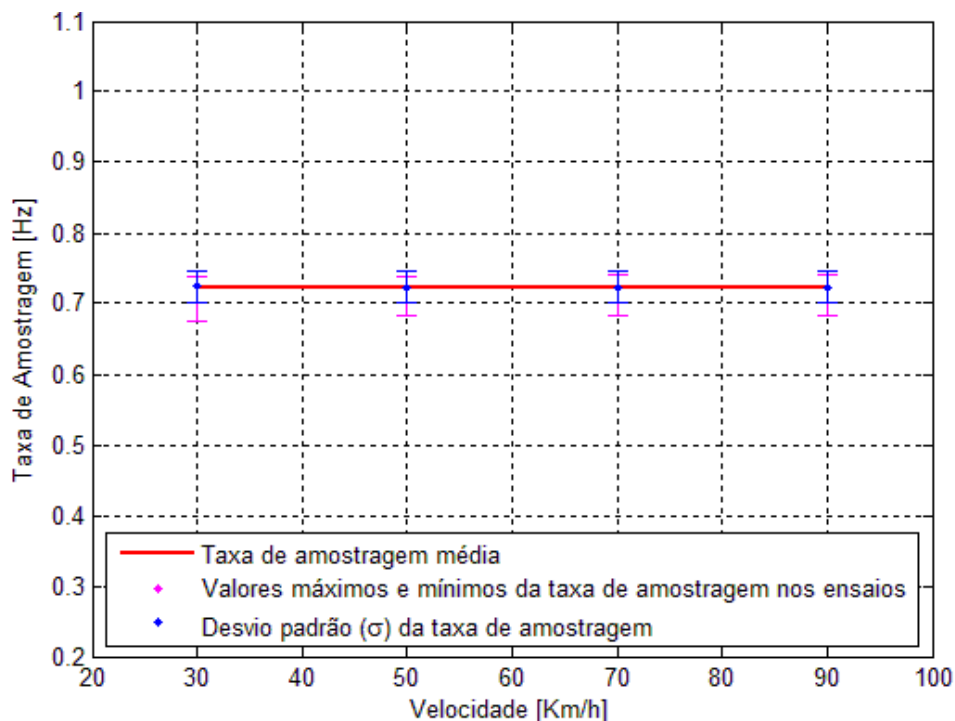


Figura 5-26 - A frequência de amostragem média obtida durante os ensaios sobre vegetação, em função da distância.

A nível da taxa de amostragem e à semelhança do teste anterior, esta manteve um valor de cerca de 0,72Hz, valor abaixo do anunciado (1Hz), não se registando grandes diferenças entre ensaios (ver Figura 5-26).

Em suma, para vegetação, considera-se não existirem variações significativas das medições em função da velocidade em relação ao solo. O fator de correção aplicado mostra-se ajustado, embora com um ligeiro erro nos ensaios a 30km/h e 50km/h. O Sensor AGL demonstrou durante o teste boa precisão e exatidão, superando

o valor de referência para o DGPS, embora a taxa de amostragem média se mantenha abaixo do valor anunciado pelo fabricante.

5.2 Teste em Voo

O teste em voo foi realizado com objetivo de avaliar o desempenho do Sensor AGL, em condições normais de operação, face ao sistema DGPS em termos altimétricos. Este teste envolve, assim, a operação deste sensor na presença de várias fontes de erro em simultâneo, como as vibrações, o voo sobre várias superfícies a diversas altitudes, velocidades, atitudes de nariz e pranchamentos, o ruído e a atenuação atmosférica. Desta forma, e dado que não foi possível a utilização de um recetor GPS independente como referência para o teste, utilizou-se a altitude barométrica determinada a partir da pressão estática medida pelo *Piccolo* enquanto referência altimétrica. Uma vez que nos testes anteriores foram determinados erros sistemáticos em função da distância, o perfil de erro encontrado foi introduzido no *script* de pós-processamento de forma a possibilitar a correção das medições realizadas em voo.

A nível do número de ensaios realizados, para este teste apenas foram feitos dois voos no CFMTFA, com a duração de cerca de uma hora cada. O insuficiente⁵ número de voos deveu-se a problemas técnicos com a plataforma utilizada e a restrições de tempo para a entrega da dissertação.

5.2.1 Perfil de Voo Planeado

De modo a avaliar de forma o mais abrangente possível o desempenho do Sensor AGL, foi planeado um perfil de voo que incluísse não só a fase da aterragem (fase em que o sensor é utilizado pelo *Piccolo*), mas também algumas das manobras mais frequentes em voo como linha de voo, voltas e circuitos a várias altitudes e velocidades, sobrevoando vários tipos superfícies. Neste planeamento foram também tidos em conta os limites de operação da plataforma: altitude de voo automático entre os 150m e os 500m, e velocidade entre os 18m/s e os 23m/s. Para a realização de algumas manobras a altitudes mais baixas recorreu-se ao voo manual, sendo o UAV controlado pelo operador no solo.

As manobras executadas em ambos os voos foram as seguintes:

⁵ Na medida em que os ensaios realizados não foram suficientes para a obtenção de dados conclusivos.

- Voltas com um ângulo de pranchamento de 5°, 15° e 25°, a 20m/s e a altitudes de 180m e 200m (voo automático);
- Circuito sobre vegetação a 20m/s, a 160m e 180m de altitude (voo automático);
- Passagens altas sobre a pista a altitudes de 160m, 180m e 200m e velocidades de 18m/s e 23m/s (voo automático);
- Passagens baixas sobre a pista a cerca de 100m (voo manual);
- Aproximação para aterragem automática por DGPS (abortada);
- Aterragem manual;

Nota: Todas as altitudes indicadas são elipsoidais (em relação ao elipsoide WGS84) sendo que a elevação do ponto de tocar na pista é cerca de 89,5m.



Figura 5-27 - Traçado terreno do segundo voo realizado. (obtido a partir da aplicação Google Earth)

5.2.2 Procedimentos Pré-Ensaio e Pós-Ensaio

Tratando-se de ensaios a realizar em voo, é de elevada importância a definição dos procedimentos a realizar, antes e depois do voo, que permitam não só evitar demoras, mas também prevenir o esquecimento de pormenores importantes para a realização dos ensaios.

Antes do início de cada ensaio, por não ter sido possível programar a execução automática do *software* para o teste em voo ao iniciar a placa PC/104, optou-se por fazê-lo de forma manual através do protocolo SSH (*Secure Shell*) e da aplicação 'screen'. Assim, mediante um cabo 'Ethernet', a placa é ligada a um outro computador e, através dele, são realizadas todas as operações necessárias. Foram então

definidos os procedimentos a executar depois do equipamento a bordo da aeronave estar ligado, mas antes do início do voo:

- Conectar o computador à PC/104;
- Colocar o *Piccolo* a enviar os dados de telemetria para a PC/104 a 25Hz;
- Executar a aplicação 'screen', o ROS e os nós necessários para o teste;
- Verificar o funcionamento do dispositivo de testes (*software* e *hardware*);
- Desconectar o computador da PC/104;

Após a realização do voo e antes do material elétrico a bordo da plataforma ser desligado, é recolhido o ficheiro criado pelo 'rosvbag' que contém todas as mensagens publicadas durante o ensaio. Para tal, são seguidos os seguintes procedimentos:

- Conectar o computador à PC/104;
- Parar a execução do ROS e dos seus nós;
- Copiar o ficheiro criado pelo 'rosvbag' para o computador;
- Desligar a PC/104;
- Desconectar o computador da PC/104;
- Desligar o restante equipamento elétrico a bordo;

5.2.3 Resultados obtidos

Embora o funcionamento do *software* tenha sido testado no solo com sucesso e os procedimentos antes e depois do voo corretamente aplicados, em ambos os voos não foram recolhidos dados suficientes para tirar conclusões em relação ao desempenho do Sensor AGL.

No primeiro voo realizado, apenas foram guardados, pelo 'rosvbag', os primeiros 7 minutos de leituras do sensor e dados de telemetria desde o início da execução do *software*. Dado que a falha de gravação ocorreu durante a rolagem do UAV até à pista, suspeita-se da ocorrência de um mau contacto entre a bateria e a placa PC/104, embora, por motivos técnicos, não tenha sido possível confirmar esta ocorrência.

No segundo voo, após a execução de todos os procedimentos e uma verificação mais atenta das conexões na plataforma, verificou-se que todos os dados de telemetria foram guardados durante o voo. No entanto, apenas foram capturadas

medições do Sensor AGL para os primeiros 2 minutos desde o início da execução do *software*, ainda antes do arranque do motor. Logo após a aterragem, depois da realização de um teste de funcionamento ao equipamento utilizado com êxito, excluiu-se a falha por mau contacto como uma das possíveis causas. Suspeita-se, assim, que possíveis interferências entre a placa computacional e a antena DGPS estejam na origem desta situação e tenham levado à corrupção dos dados enviados pelo Sensor AGL.

Os resultados esperados neste teste, tendo em conta os testes no solo anteriormente realizados, seriam valores próximos das altitudes DGPS e barométrica corrigidas para AGL, acompanhando as variações indicadas pelas mesmas. Embora estes resultados fossem importantes para o enriquecimento desta dissertação, uma vez que não foi possível a utilização de um recetor GPS independente a bordo, não seria possível fazer uma análise objetiva do desempenho do sensor em relação ao DGPS.

Assim, recomenda-se que antes da utilização do Sensor AGL em voo sejam realizados voos de experiência com este sensor e o sistema DGPS ligados ao *Piccolo* em simultâneo, e se avalie a capacidade para a realização de aterragens automáticas em segurança.

Capítulo 6 - Conclusões

A utilização das plataformas dos UAS tem sofrido um grande crescimento ao longo dos últimos anos, tanto no âmbito civil como militar. Este aumento é justificável graças às suas vantagens, mas também devido aos avanços tecnológicos que possibilitaram o desenvolvimento de plataformas mais autónomas e a redução do número de tarefas a realizar pelos operadores no solo. A Força Aérea conta hoje com três tipos de UAS desenvolvidos pelo CIAFA, tendo já participado em diversos projetos com os mesmos e totalizado cerca de 500 horas de voo. Fruto da necessidade de reduzir o erro altimétrico do sistema DGPS, utilizado para a realização das aterragens automáticas com a plataforma *Alfa-Extended*, optou-se por utilizar um Laser-Altímetro, já previamente adquirido pelo CIAFA, com um erro teoricamente mais baixo.

Com esta dissertação pretendeu-se analisar o desempenho do Sensor AGL, em termos de precisão e exatidão, enquanto sistema auxiliar para aproximação e aterragem de UAV. Para tal, numa primeira fase começou-se por realizar uma revisão bibliográfica sobre aproximações de precisão e aterragens automáticas de plataformas tripuladas e não tripuladas. No caso particular das aterragens automáticas de UAV, incidiu-se sobre os vários sistemas disponíveis no mercado, bem como sobre os utilizados pelo CIAFA. Numa segunda fase, foram investigados os conceitos fundamentais da Laser-Altimetria, nomeadamente os princípios básicos de funcionamento do Laser e do Laser-Altímetro, enunciando as suas características, vantagens e limitações. Em particular, foram também analisadas as características do Sensor AGL, nomeadamente a sua interface e as suas limitações teóricas. Por fim, foram comparados os sistemas Laser-Altímetro e DGPS, enunciando as vantagens e desvantagens de ambos.

Posteriormente, tendo em vista a realização de testes com o Sensor AGL e a sua possível utilização em outras aplicações independentes do *Piccolo*, foi desenvolvida a biblioteca de comunicação para este sensor. A partir deste *driver*, foi então criado o *software* de leitura com GUI e, posteriormente, o *software* em ROS para a realização dos testes em voo. Desenvolveram-se, igualmente, os algoritmos de pós-processamento para análise dos dados recolhidos durante os testes realizados e posterior avaliação do desempenho do sensor. A nível de *hardware*, para os testes no solo foram construídos suportes que permitissem a realização dos mesmos e, para

o teste em voo, instrumentou-se devidamente a plataforma, construindo um suporte no interior do UAV e acondicionando o Sensor AGL no mesmo.

Por fim, foram realizados os testes que, através da obtenção de leituras sobre várias superfícies, a várias velocidades, distâncias e ângulos de incidência, permitiram avaliar o desempenho deste sensor e cumprir o objetivo desta dissertação. Infelizmente, devido aos problemas encontrados no teste em voo, alguns objetivos específicos não foram concluídos, nomeadamente a verificação do comportamento do sensor em condições normais de operação e durante aproximações à pista.

6.1 Resultados finais e Recomendações

Os testes realizados com o Sensor AGL mostraram um desempenho, em termos de precisão e exatidão, dentro do esperado, superando, em alguns ensaios, os próprios valores anunciados pelo fabricante. Desta forma, o desempenho deste sensor é superior ao do sistema DGPS (a nível altimétrico), verificando-se um erro máximo das medições corrigidas de 0,3m, valor inferior a metade do erro altimétrico médio do DGPS (0,75m). Embora tenham sido encontrados erros sistemáticos ao longo dos testes, estes revelaram-se facilmente corrigíveis através do perfil de erro encontrado.

A nível da taxa de amostragem, esta manteve-se abaixo do valor anunciado pelo fabricante em todos os ensaios, com uma média de cerca de 0,72Hz, ou seja, com um intervalo de cerca de 1,4 segundos entre medições. Estes resultados, embora desfavoráveis, não são considerados incompatíveis com a realização de aterragens automáticas com o *Piccolo*, uma vez que as leituras do sensor ainda passam por um filtro de Kalman no interior deste piloto-automático.

Em relação ao ângulo de incidência do feixe Laser sobre a superfície, o testes realizados mostraram que, em determinadas situações, este pode afetar negativamente a exatidão das medições e a taxa de leitura do sensor. No entanto, dado que todos os valores obtidos se mantiveram dentro dos anunciados pelo fabricante (exceto a taxa de leitura do sensor) e que este sensor apenas é utilizado pelo *Piccolo* na perna final da aterragem, considera-se não haver incompatibilidades para a realização de aterragens automáticas.

Nos testes estáticos em diferentes tipos de superfícies não foram identificadas variações significativas das medições, à exceção do ensaio sobre asfalto com uma camada de água. Nos testes em movimento no solo, os resultados obtidos permitiram

concluir a inexistência de variações significativas das medições em função da velocidade, independentemente do tipo de superfície. No teste em voo, pelos problemas encontrados na realização dos ensaios, não foram obtidos dados conclusivos.

Em suma, no sentido de responder à pergunta de partida que orientou esta dissertação, apurou-se que o Sensor AGL tem uma performance altimétrica claramente superior à do sistema DGPS, sendo vantajosa a sua utilização para a redução do erro altimétrico deste sistema na realização de aterragens automáticas. Não se recomenda, no entanto, que as medições de baixa resolução sejam utilizadas para a aterragem, e aconselha-se alguma cautela na operação sobre superfícies muito molhadas. Por outro lado, aconselha-se que antes da utilização deste sensor em voo para a execução de aterragens automáticas, haja a realização prévia de voos de teste.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

No seguimento de todo o trabalho desenvolvido nesta dissertação, para a futura validação deste sensor para a execução de aterragens automáticas, sugere-se a realização de um voo de teste com os sistemas Sensor AGL e DGPS a bordo, juntamente com um recetor GPS independente enquanto referência altimétrica. Desta forma será possível a comparação dos desempenhos destes dois sistemas nas mesmas condições de voo, e a posterior validação do Laser-Altímetro. Sugere-se também a realização de voos de teste com o Sensor AGL conectado ao *Piccolo*, para avaliação da capacidade de serem realizadas aterragens automáticas em segurança com este sensor. Caso sejam adquiridos outros Sensores AGL, recomenda-se a verificação do perfil de erro sistemático dos mesmos, uma vez que este pode diferir do perfil encontrado para o sensor utilizado.

A nível mais teórico, um dos principais constrangimentos encontrados ao longo deste trabalho prende-se com o défice de literatura no que toca a requisitos de navegação para UAV. Nesse sentido, dada a pequena dimensão das plataformas utilizadas pelo CIAFA, recomenda-se a definição dos requisitos de navegação necessários para a realização de aterragens automáticas para cada uma delas. Sugere-se também a definição dos limites máximos considerados aceitáveis para uma aterragem com cada uma das plataformas (a nível estrutural), e a posterior avaliação da suavidade de cada um dos métodos de aterragem utilizados pelo CIAFA (manual, através de DGPS e através de Laser-Altímetro). Desta forma tornar-se-á possível, no

futuro, selecionar de forma mais fácil e objetiva quais as melhores soluções disponíveis para a realização de aterragens automáticas de forma segura.