

FÁBIO NUNO DIAS CAMACHO

**CARATERIZAÇÃO PROBABILÍSTICA DE
ENCONTRO ENTRE AERONAVES PARA A FINAL
DA PISTA 03 AO AEROPORTO HUMBERTO
DELGADO**

**MÉTODO DE ALTERAÇÃO DINÂMICA DA *WELL
CLEAR AREA* ENTRE AERONAVES TRIPULADAS
E NÃO TRIPULADAS ABAIXO DOS 1000'**

Orientador: Professor Doutor José Manuel Ivo Carvalho Vicente

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias

Escola de Ciências Económicas e das Organizações

Lisboa

2019

FÁBIO NUNO DIAS CAMACHO

**CARATERIZAÇÃO PROBABILISTICA DE
ENCONTRO ENTRE AERONAVES PARA A FINAL
DA PISTA 03 AO AEROPORTO HUMBERTO
DELGADO**

**MÉTODO DE ALTERAÇÃO DINÂMICA DA *WELL
CLEAR AREA* ENTRE AERONAVES TRIPULADAS
E NÃO TRIPULADAS ABAIXO DOS 1000'**

Dissertação defendida em provas públicas para obtenção do grau de Mestre em Gestão Aeronáutica na Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias no dia 30/01/2020, perante o júri, nomeado pelo Despacho de Nomeação n.º: 18/2020, de 17 de janeiro de 2020, com a seguinte composição:

Presidente: Professor Doutor Idalino André Rodrigues Nascimento Magrinho

Arguente: Professor Doutor José Carlos Dias Rouco

Orientador: Professor Doutor José Manuel Ivo Carvalho Vicente

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias

Escola de Ciências Económicas e das Organizações

Lisboa

2019

“Não se espante com a altura do voo. Quanto mais alto, mais longe do perigo. Quanto mais você se eleva, mais tempo há de reconhecer uma pane. É quando se está próximo do solo que se deve desconfiar.”

**Santos Dumont, pioneiro da aviação
(1873-1932)**

Dedicatória

O mundo da aviação, em parte devido ao impacto que este meio de transporte tem sobre as sociedades modernas, tornou-se numa máquina complexa que requer uma manutenção constante por uma série de profissionais dotados de virtudes sociotécnicas indispensáveis para a aviação. Durante a minha vida profissional, tive o privilégio de me cruzar com homens e mulheres, nos diferentes domínios da aeronáutica, que além das reconhecidas qualidades técnicas foram capazes de incentivar, apoiar, motivar e criar as condições para que aquele jovem que lhes sucede seja um espelho à sua imagem, e se possível, que reflita uma luz o mais brilhante possível. A todos aqueles que contribuíram como mentores, independente do *status* e da extensão da participação, durante o tempo que desempenhei funções como investigador, controlador de tráfego aéreo militar, oficial de operações de voo, instrutor no âmbito da aviação, gestor de um centro de controlo de operações aéreas e auditor, dedico esta tese, à qual agradeço com apreço, a amizade profunda e a contribuição para tornar-me um profissional ainda melhor.

Não obstante, aproveito a oportunidade para dar um bem haja à minha família, um pilar fundamental da minha educação e formação como homem, pelo apoio constante, confiança, valores e motivação contínua para efetuar os voos mais altos que os céus o permitam.

Agradecimentos

Agradeço publicamente as seguintes pessoas da esfera pessoal e profissional que contribuíram diretamente para a concretização dos meus objetivos pessoais, nomeadamente:

a Lénia Carisa Abreu Brito, por todo o seu apoio e estabilidade,

a Waldemar Caires Camacho, Maria Cesalina Paixão Dias Camacho, Cláudia Tatiana Dias Camacho e Maria da Luz Ponte Abreu pela força motivacional nas derrotas e nas conquistas,

ao Major Alberto Pinho, Controlador Aéreo, pela amizade, profissionalismo e deposição de confiança,

ao Tenente Coronel António Rita, Controlador Aéreo e Auditor, por ter sido, não só pelo zelo do bem-estar pessoal, mas também por ser um exemplo e um mentor de índole técnica no âmbito da aviação militar e civil,

ao Professor José Vicente, Professor Doutorado da ULHT, pela sua disponibilidade em ser orientador, pelos conselhos, acompanhamento contínuo e apoio em cada solicitação.

a todos aqueles que se cruzaram durante o meu percurso profissional e contribuíram de alguma forma para apurar os meus conhecimentos técnico-científicos, nomeadamente ao Bruno Custódio Vasconcelos, Filipe Cerca, Maria Manuel, Pedro Almeida, Ana Rita, Sónia Mendes, Inês Vitoriano, Luís Paiva, Ricardo Alves Ribeiro e César Mesquita.

Abreviaturas, Siglas e Símbolos

<i>s</i>	Segundos
<i>r</i>	Raio
Lat	Latitude
Lon	Longitude
<i>v</i>	velocidade (m/s)
CLat	Coordenada de Latitude (fixa na projeção cartesiana geodésica)
CLon	Coordenada de Longitude (fixa na projeção cartesiana geodésica)
<i>x</i>	Valor da coordenada de latitude em minutos decimais
<i>y</i>	Valor da coordenada de longitude em minutos decimais
<i>m</i>	Metros
<i>F0</i>	Altura da aeronave sobre a superfície da pista (aterrada)
<i>F5</i>	Altura de 500' (150 metros) acima da superfície da pista
<i>F10</i>	Altura de 1000' (300 metros) acima da superfície da pista
#	Dado de posição no ficheiro .so3
CC	Coordenada central no formato WGS84
<i>n</i>	número genérico
WGS84	Coordenadas no sistema geodésico terrestre 84 (graus, minutos, segundos)
AEC	(Airspace Encounter Category): Categoria de encontro no Espaço aéreo
CTR	(air traffic control zone): Zona de controlo onde é prestado o serviço de tráfego aéreo de torre
CTA	(Air traffic approach zone): Zona de controlo onde é prestado o serviço de tráfego aéreo de aproximação

CPA	(Closest Point of Approach): Ponto mais próximo de aproximação
DAA	(Detect And Avoid): Detetar e Evitar
Eq.	Equação
n	Número
LoWCL	(Lose of Well Clear): Perda da Área Livre de Separação
WCL	(Well Clear Area): Área Livre de Separação
RWCL	(Remain Well Clear): Área Livre de Separação Assegurada
UA	(Unmanned Aircraft): Aeronave não tripulada
UAS	(Unmanned Aircraft Systems): Sistemas de aeronaves não tripuladas
ILS	(Instrument Landing System): Sistema de aproximação de instrumentos
NDB	(Non-Directional Beacon): Rádio-Farol não direcional
VOR	(VHF Omni Directional Range): Rádio-Farol VHF de cobertura Omi
Direcional	
UTM	(Unmanned traffic management): Gestão de tráfego aéreo não tripulado
U-space	(Unmanned Airspace): Espaço aéreo não tripulado
ADS-B	(Automatic Dependent Surveillance Broadcast):
Modo/S	Transponder Modo S
RPAS	(Remoted Piloted Aircraft Systems): Sistemas de aeronaves pilotadas remotamente
VLL	(Very Low Level): Altitude muito baixa
EASA	Agência Europeia para a Segurança da Aviação
IATA	Associação Internacional de Transportes Aéreos
ICAO	Organização da Aviação Civil Internacional
⊙	Coordenada WGS84 central (CC)



Coordenada WGS84 genérica



Coordenada WGS84 dos pontos geográficos das rotas VFR de helicópteros



Coordenadas F5 agrupadas em $(CC)_n$



Coordenadas F5 agrupadas em $(CC)_{n+1}$



Coordenadas F5 agrupadas em $(CC)_{n+2}$



Coordenadas F10 agrupadas em $(CC)_n$



Coordenadas F10 agrupadas em $(CC)_{n+1}$



Coordenadas F10 agrupadas em $(CC)_{n+2}$



Coordenadas F0 relativas a F10 agrupadas em $(CC)_n$



Coordenadas F0 relativas a F5 agrupadas em $(CC)_{n+1}$

Resumo

A aviação moderna, devido às novas tendências tecnológicas nos serviços e na indústria aliada ao digitalismo, entrou numa fase de transmutação de mudança rápida, com o objetivo de permitir a integração de aeronaves não tripuladas no espaço aéreo. A presente dissertação teve como objetivo caracterizar o local na camada a 150 m de altura (500') e a 300 de altura (1000') acima da superfície da pista 03 do Aeroporto Humberto Delgado, usando dados das trajetórias de aeronaves tripuladas, onde a probabilidade e o risco de um encontro com uma aeronave tripulada é maior, e a partir do qual a probabilidade de encontro horizontal reduz-se de forma acentuada até ser nula.

O estudo efetuado não discrimina qualquer tipo de operação à pista, abrangendo as aproximações visuais e aquelas baseadas em rádio ajudas, desde que o operador tenha submetido um plano de voo para operar no Aeroporto Humberto Delgado.

Os resultados demonstram que é possível identificar e caracterizar o local específico onde as aeronaves tripuladas cruzam os 300m e os 150m quando efetuam manobras de aterragem, bem como o local a ter em consideração para definir de forma simples uma *Well Clear Area* dinâmica de estado 0, 1 e 2, entre aeronaves tripuladas e não tripuladas, com o objetivo de assegurar uma separação mínima entre essas aeronaves na final da aproximação para uma pista. O estudo permite que os operadores de aeronaves não tripuladas a operar no futuro 'U-space', de forma a assegurar operações na zona urbana outrora inacessíveis face ao risco no ar. O método baseia-se num método dinâmico dependente do padrão das trajetórias e do fluxo tático de informação digital interoperável entre o prestador de serviços, e entre estes e as aeronaves não tripuladas, de forma a alterar o estado da 'Well Clear Area' identificada. Este método dinâmico de garantir uma separação padronizada de acordo com o local possibilita, desde que seja garantido pelo operador ou o construtor o cumprimento dos requisitos técnicos específicos relativos à certificação caso esta seja necessária face ao risco, as operações de aeronaves não tripuladas na vizinhança dos aeroportos Internacionais em condições de segurança para com os demais utilizadores do espaço aéreo.

Palavras-Chave: Área Livre de Separação; Estado da Área Livre de Separação; Aeronaves não tripuladas; Gestão de tráfego aéreo não tripulado; Categoria de encontro de espaço aéreo

Abstract

Modern aviation, due to the new technological trends in the aviation industry and services coupled with digitalism, has entered a rapidly changing transmutation phase with the aim of enabling unmanned aircrafts to be integrated into airspace. The present dissertation aimed to characterize the zone in a layer at 150 m high (500') and 300 m (1000') above the surface of runway 03 at Humberto Delgado Airport, using data from manned aircraft trajectories, where the probability and the risk of encountering a manned aircraft is higher, and from which the probability of horizontal encounter is sharply reduced to zero.

The conducted study does not discriminate any type of runway operation, and covers visual operations and those assisted by navigation aids, provided that the operator has submitted a flight plan to operate at Humberto Delgado Airport.

The results demonstrate that is possible identify and characterize the specific location where manned aircraft cross the 300m and 150m layer when performing landing maneuvers, as well as the geographic area to be considered in order to define a dynamic Well Clear Area according with status 0, 1 and 2, between manned and unmanned aircraft, ensuring a proper minimum separation between such unmanned aircraft and manned aircraft in the final segment of an approach. The study allows unmanned aircraft operations in the future U-space, ensuring urban operations close to complex airport environments, once inaccessible due to airborne risk. The method is based on a dynamic status according with the trajectory patterns of manned aircrafts and tactical flow of interoperable digital information between the service providers, and between those and unmanned aircrafts, in order to change the state of the Well Clear Area proposed in the study. This dynamic method of ensuring harmonized separation according to the location allow, as long as the operator or the manufacturer comply with the technical certification specifications requirements for UAS certification as per risk level, ensuring a safe unmanned aircraft operations in the vicinity of International airports.

Keywords: 'Well Clear Area'; 'Well Clear Area Status', 'Unmanned Aircraft Systems'; 'Unmanned Traffic Management'; 'Airspace Encounter Category'

Índice Geral

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 – Enquadramento genérico, questão de Investigação e objetivos	2
1.2 – Importância da dissertação	3
1.3 – Estrutura do Trabalho	4
CAPÍTULO 2: ENQUADRAMENTO.....	5
2.1 – Resenha Histórica	6
2.1.1 – As necessidades atuais	6
2.1.2 – Das primeiras operações à atualidade	10
2.1.3 – O estado atual.....	12
2.2 – Métodos de Separação	15
2.2.1 – Métodos baseados nos serviços ATM atuais	15
2.2.2 – Métodos baseados nas regras do ar e nos equipamentos abordo para garantir uma WCL.....	20
2.3 – Métodos de separação concetualizados para as aeronaves não tripuladas	22
2.3.1 – Sistemas baseado no equipamento	22
CAPÍTULO 3: DESENVOLVIMENTO	32
3.1 – O quadro regulatório.....	33
3.2 – As categorias de operação e a integração no espaço aéreo.....	33
3.3 – A importância dos sistemas DAA e do UTM nas operações de risco elevado para garantir o RWCL e evitar o LoWCL	35
3.4 – Caracterização do segmento final da aproximação ILS à pista 03	44
3.5 – Trajetórias reais de aeronaves tripuladas nas aproximações a pistas ..	48
3.6 – Caracterização do bloco de Espaço Aéreo	52
3.7 – Caracterização do bloco de Espaço Aéreo	54
CAPÍTULO 4: METODOLOGIA	58

4 – Métodos de separação concetualizados para as aeronaves não tripuladas	59
4.1 – Enquadramento da metodologia	59
4.2 – Enquadramento da metodologia	61
4.2.1 – Metadados	61
4.2.2 – Conversão em dados, organização e cálculos	64
4.2.3 – Métodos de cálculo, análise estatística e agrupamento.....	67
4.2.4– Pressupostos para garantia de RWCL nos estados	70
4.2.5 – Projeção dos círculos e dos polígonos	71
CAPÍTULO 5: ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	73
5.1 – Ocorrências e o padrão das trajetórias a 1000' e 500' AGL.....	74
5.2 – Projeção do padrão das trajetórias	81
5.3 – Projeção do WCL dinâmico e a otimização do espaço aéreo	83
5.3.1 – Estado 0, 1 e 2 de WCL	83
5.3.2 – Otimização do uso do espaço aéreo.....	89
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES	95
6.1 – Principais conclusões.....	96
6.2 – Limitações do estudo	99
6.3 – Perspetivas de investigação futuras	100

Índice de Equações

Equação 1 – Converter minutos decimais em graus (S, N).....	65
Equação 2 – Identificar a latitude(S, N)	65
Equação 3 – Converter minutos decimais em minutos (N).....	65
Equação 4 – Converter minutos decimais em segundos (N).....	65
Equação 5 – Converter minutos decimais em graus (W, E).....	65

Equação 6 – Identificar a Longitude (W, E).....	65
Equação 7 – Converter minutos decimais em minutos (W)	65
Equação 8 – Converter minutos decimais em segundos (W)	66
Equação 9 – Junção de latitude (N) e longitude (W) num ficheiro .xls.	66
Equação 10 – Equação da forma normal de um círculo num sistema de coordenadas ..	67
Equação 11 – Cálculo do raio no estado 1	67
Equação 12 – Cálculo do raio no estado 2	67
Equação 13 – Cálculo do número de ocorrências do dado na amostra	68
Equação 14 – Cálculo da taxa de ocorrência do dado na amostra.....	68
Equação 15 – Cálculo da média	68
Equação 16 – Cálculo da variabilidade	68
Equação 17 – Otimização (OT) comparativa do espaço aéreo disponível para as operações abaixo de 120m de altura.....	69
Equação 18 – Otimização (OT _t) total do espaço aéreo conferida pelo modelo estático do Anexo ao Regulamento da ANAC n.º 1093/2016 face à área da CTR	70
Equação 19 – Otimização (OT _t) do espaço aéreo conferida pelo modelo dinâmico de WCL face à área da CTR.....	70
Equação 20 - Otimização (OT _{WCL vs 1093}) total do espaço aéreo conferida pelo modelo dinâmico de WCL no estado 2 face ao Regulamento da ANAC n.º 1093/2016	70

Índice de Figuras

Figura 1 – Benefícios das operações de aeronaves não tripuladas e da integração das operações no espaço aéreo através do U-space	6
Figura 2 – Benefícios a longo prazo do U-space.....	7
Figura 3 – Plano de integração das aeronaves não tripuladas no espaço aéreo através do desenvolvimento do U-space e dos serviços associados	8
Figura 4 – Plano de implementação dos serviços UTM.....	9

Figura 5 – Exemplo de um modelo esquemático do tipo de variáveis e parâmetros usados para definir uma WCL para uma aeronave não tripulada.....	14
Figura 6 – Técnica de separação lateral baseada no conhecimento da área de conflito	16
Figura 7 – Exemplo de separação baseada pontos geográficos.....	17
Figura 8 – Exemplo de separação em tempo baseada no rasto de turbulência.....	17
Figura 9 – Exemplo de separação horizontal baseada em distância através de rádio ajudas (VOR)	19
Figura 10 – Exemplo de separação longitudinal de uma aeronave em descida e outra a manter o nível, baseada em tempo através de um fixo de uma rádio ajuda	19
Figura 11 – Exemplo do funcionamento de um sistema ACAS/TCAS II para garantir WCL	21
Figura 12 – Funcionamento de um sistema DAA	23
Figura 13 – Exemplo de falhas de sistemas que podem causar uma colisão em voo devido à LoWCL	28
Figura 14 – Modelo semântico da troca de pacotes de informação nas operações UAS	29
Figura 15 – Representação semântica da organização do espaço aéreo e do U-space onde serão prestados os serviços UTM	30
Figura 16 – Exemplo de um modelo de deteção e evasão (DAA) aplicável a aeronaves não tripuladas que não de pequenas dimensões.....	35
Figura 17 – Desenvolvimento dos modelos de encontros entre aeronaves tripuladas baseados no TCAS	37
Figura 18 – Técnicas de inferência bayesiana para gerar ponderações relacionadas com a probabilidade dos dados observados serem gerados por uma rede em particular	39
Figura 19 – Volume WCL, tempo para LoWCL e tempo para RWCL	40
Figura 20 – Modelo de previsibilidade de alcance médio aplicável a aeronaves tripuladas	43
Figura 21 – Segmentos de uma aproximação por instrumentos.....	44

Figura 22 – Cobertura azimutal de um LLZ ‘localizer’ e da antena da elevação GP Glide Path).....	45
Figura 23 – MSA ILS RWY 03 CAT II/III LPPT.....	47
Figura 24 – Projeção da final ILS da RWY03 do Aeroporto Humberto Delgado elaborada a partir da carta de aproximação da carta de aproximação LPPT AD 2.24.12 – 1, e de acordo com as orientações da ICAO Doc. 8168, Vol. I, 2006.	47
Figura 25 - Carta da aproximação ILS RWY 03 CAT II/III LPPT.....	48
Figura 26 – Representação de uma final de aproximação por instrumentos com a respetiva informação dos “dot” e o desvio azimutal e de ladeira associado de acordo com as orientações da ICAO Doc. 8168, Vol. I, 2006.	49
Figura 27 – Recorte da carta de aproximação visual para a pista 03 do aeroporto Humberto Delgado. A altitude mínima de voo é 2500’ ou 750m	51
Figura 28 – Recorte das rotas visuais para helicópteros na zona de controlo de lisboa (esquerda) e a entrada e saída a partir da intersecção da RWY03/35. O helicópteros operam entre 1000’ e 1500’ dependendo da porção da rota que está a ser voada.....	52
Figura 29 - Projeção das coordenadas da zona de controlo de Lisboa num polígono (verde) no Google Earth	54
Figura 30 - Projeção da área proibida e das áreas de restrição operacional na zona de controlo de Lisboa	57
Figura 31 – Dados das trajetórias referentes aos ciclos AIRAC de 21 de junho de 2018 a 18 de junho de 2018	59
Figura 32 – Zona IFPZ alargada.....	62
Figura 33 – Representação da elaboração dos polígonos referentes ao estado 0, 1 e 2	72
Figura 34 – Zona geográfica onde as aeronaves tripuladas descem abaixo de F10 e F5 com as coordenadas CC (A) e perfurações nas camadas (B)	82
Figura 35 – Projeção dos estados dinâmicos 0, 1 e 2 a F5 e F10	84
Figura 36 – Alteração dinâmica da WCL em F5 (estado 0, 1 e 2).....	85
Figura 37 – Alteração dinâmica da WCL em F10 (estado 0, 1 e 2).....	87

Figura 38 – Alteração dinâmica simultânea em F5 e F10 de acordo com o estado 0, 1 e 2	89
Figura 39 – Comparação da dimensão da projeção das áreas estáticas estabelecidas no anexo ao Regulamento da ANAC n.º 1093/2016 (à esquerda) sobrepostas com as áreas dinâmicas no estado 0, 1 e 2 (à direita).	91

Índice de Gráficos

Gráfico 1 – Média e desvio padrão dos valores agrupados da Lat.	78
Gráfico 2 – Média e desvio padrão dos valores agrupados da Lon.	78
Gráfico 3 – Variação dos raios entre os estados WCL onde o AEC é 100% (estado 0) e os estados dinâmicos 1 e 2.....	80
Gráfico 4 – Taxa de disponibilidade Actr (OT) em ativação total da WCL do Estado 2 F5, Estado 1 F10 e estado 2 F10 (Km ²) vs. Áreas de proteção operacional e proibidas do Anexo ao Regulamento da ANAC n.º 1093/2016	92
Gráfico 5 – <i>Taxa de disponibilidade da Actr (OT) considerando as Áreas de proteção operacional e proibidas do Anexo ao Regulamento da ANAC n.º 1093/2016</i>	93
Gráfico 6 – Otimização <i>OTWCL</i> vs 1093% obtida entre o método dinâmico de WCL no Estado 2 F5, Estado 1 F10 e estado 2 F10 (Km ²) relativamente às Áreas de proteção operacional e proibidas do Anexo ao Regulamento da ANAC n.º 1093/2016.....	94

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros requeridos de performance das comunicações para a troca de pacotes de informação	25
Tabela 2 – Estudo quantitativo da disponibilidade e integridade de sistemas necessários para manter um voo seguro e aterragem (excluindo LoWCL) dependendo da complexidade da aeronave.....	26
Tabela 3 – Sensibilidade da reação de um sistema TCASII a diferentes altitudes de voo	42

Tabela 4 – Caracterização do espaço aéreo da zona de controlo de Lisboa	53
Tabela 5 – Códigos dos blocos de informação contida no ficheiro .so6	63
Tabela 6 – Exemplo de um dado filtrado para um voo de UUEE para LPPT realizado no dia 21 de junho de 2018.....	64
Tabela 7 – Número e percentagem de ocorrências dos dados de Lat e Long a F10 na CTR de Lisboa	74
Tabela 8 – Número e percentagem de ocorrências dos dados de Lat e Long a F5 na CTR de Lisboa	75
Tabela 9 – Número e percentagem de ocorrências dos dados de Lat e Long a F0 medidos para as trajetórias iniciadas em F5 na CTR de Lisboa	75
Tabela 10- – Número e percentagem de ocorrências dos dados de Lat e Long a F0 medidos para as trajetórias iniciadas em F5 na CTR de Lisboa.....	76
Tabela 11 – Coordenadas centrais obtidos através da média dos dados agrupados e a respetiva variabilidade (DP)	77
Tabela 12 – Coordenadas centrais no formato WGS84 e os respetivos raios dos círculos em metros referentes aos diferentes estados dinâmicos	79
Tabela 13 – Otimização percentual do espaço aéreo acessível aos UAS pelo modelo dinâmico comparativamente com as áreas estáticas.....	90
Tabela 14 – Otimização (OTt) total do espaço aéreo conferida pelo modelo estático do Anexo ao Regulamento da ANC n.º 1093/2016.....	91
Tabela 15 – Estado WCL e ação para garantir o RWCL em cada um desses estados dinâmicos ao Regulamento da ANC n.º 1093/2016	97

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 – Enquadramento genérico, questão de Investigação e objetivos

O aumento das operações de aeronaves não tripuladas têm nos últimos anos forçado a aviação em geral a uma rápida adaptação. No entanto, a integração destas operações dependerá da forma como o risco intrínseco destas operações é devidamente mitigado, não só através das soluções tecnológicas mas também pelos sistemas funcionais disponíveis, nomeadamente os requisitos operacionais e todos os mecanismos de suporte.

A presente dissertação foi elaborada com o objetivo de apresentar um método conceptual alternativo, baseado através da identificação da RWCL mínima, de carácter dinâmico, aplicável a aeronaves não tripuladas. O dinamismo é proposto através da identificação do local exato onde as aeronaves não tripuladas passam a representar um perigo para as operações de aeronaves não tripuladas, cujo o fluxo é gerido pelos atuais padrões do ATM.

A questão central de investigação é portanto, identificar quais os locais na zona de controlo onde as aeronaves tripuladas descem abaixo das altitudes mínimas de voo de forma a criar um modelo que garanta uma separação em segurança de aeronaves não tripuladas a operar na vizinhança, verificando à posteriori se o mesmo traduz-se em um aumento de eficiência face a um modelo já existente baseado em zonas geográficas.

A identificação dos locais permite identificar o local onde ocorre a perfuração da camada e desse local e criar dois estados de RWCL, baseados em tempo e distância, que se alteram de acordo com a transmissão de um pacote de dados reduzido das aeronaves tripuladas em aproximação, em tempo real, ao qual são comparados com a base histórica do local onde se dará a trajetória provável no local identificado referido, e obtida através da análise da informação dos perfis ortogonais reais das aeronaves para uma determinada pista.

O fluxo de informação do documento inicia-se com o enquadramento e revisão bibliográfica introdutória, permitindo aferir a janela de oportunidade do estudo. No desenvolvimento, conceptualiza-se o método desenvolvido comensurando este último com a revisão bibliográfica relativa aos desenvolvimentos presentes no campo de estudo.

Atualmente não existe harmonização quanto ao método para definir o RWCL aceitável entre aeronaves tripuladas e não tripuladas, possivelmente devido à inexistência de tecnologia que permita garantir com um elevado nível de integridade e garantia uma separação contínua e em cumprimento com a distância mínima exigida.

Essa distância de separação mínima entre aeronaves tripuladas e não tripuladas a voar no mesmo espaço aéreo, mesmo que estática, não está claramente definida com fundamentos científicos para este tipo de operações, pelo que, dos dados das trajetórias referidos, é sugerido um método alternativo baseado na probabilidade de encontros em determinadas camadas e locais do espaço aéreo controlado, considerando a posição real das aeronaves tripuladas, independentemente da sua performance e desvios à linha central azimutal e na ladeira de descida em uma aproximação de instrumentos. Da análise dos resultados resultam as conclusões que apontam para a possibilidade da ser definida uma RWCL, cujo o estado dinâmico dependerá da posição geográfica de uma aeronave tripuladas no segmento respetivo do cone de aproximação.

1.2 – Importância da dissertação

O método apresentado na dissertação permite, conhecendo a posição real da aeronave no cone de aproximação, se recebido o devido pacote de informação para o software da aeronave não tripuladas, dinamicamente aumentar ou diminuir a distância do UAS à linha central do cone de aproximação, portanto à zona geográfica identificada onde passam a maior percentagem das trajetórias de aeronaves tripuladas.

Pela sua simplicidade, o método pode ser aplicado localmente para identificar o padrão local e introduzido como uma rotina no software nas aeronaves não tripuladas. Em termos da quantidade de dados a trocar com os futuros prestadores de serviços a aeronaves não tripuladas (UTM) para assegurar um estado de RWCL menor, estes seriam substancialmente reduzidos, pois uma RWCL suficientemente grande já seria assegurada no software ou num componente de suporte.

Em termos da relevância da investigação científica global, esta dissertação permite identificar os locais onde o risco real de colisão é muito elevado baseada nas

trajetórias reais das aeronaves. Este conhecimento é essencial para usar de forma mais eficiente o espaço aéreo ao mesmo tempo que se aumenta os padrões de segurança das operações.

Adicionalmente, num futuro próximo, os Estados serão obrigados a publicar zonas geográficas e definir o futuro espaço aéreo não tripulado, pelo que será necessário definir e assegurar a separação mínima entre as operações.

1.3 – Estrutura do Trabalho

A presente dissertação está organizada em 6 capítulos sendo que no primeiro é abordada de forma genérica o objetivo, pertinência e estrutura.

No segundo capítulo é efetuada uma resenha histórica do desenvolvimento das operações de aeronaves não tripuladas desde a sua génese que culmina com o devido enquadramento e o racional para justificar a pertinência e a necessidade de efetuar o estudo, detalhando a informação da introdução e do objetivo.

O terceiro capítulo centra-se na revisão bibliográfica necessária para atingir uma perceção global do estado atual do assunto estudado, bem como aprofundar os conhecimentos necessários para identificar limitações, implicações, desenvolver a metodologia e efetuar o tratamento dos dados recolhidos.

No quarto capítulo é explicada a metodologia usada e descrito todo o processo utilizado desde a aquisição ao resultado, nomeadamente explicando a fonte de metadados, a transformação desses metadados em dados passíveis de tratamento, a filtragem dos dados relevantes, a organização dos dados, os programas utilizados, os cálculos efetuados e o método de elaboração de gráficos e tabelas.

No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos do tratamento dos metadados através da metodologia usada, e considerando a questão de investigação proposta.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões do estudo, as limitações, as implicações no estado da arte atual e as oportunidades futuras.

CAPÍTULO 2: ENQUADRAMENTO

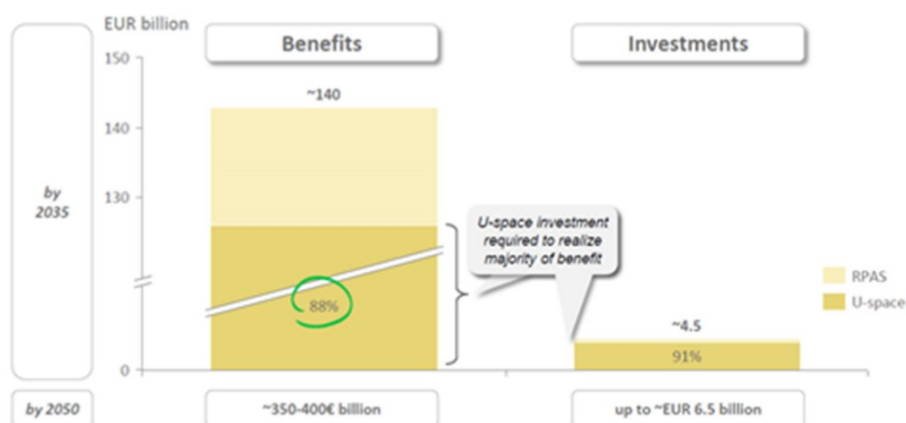
2.1 – Resenha Histórica

2.1.1 – As necessidades atuais

A aviação civil moderna tem desde os seus primórdios evoluído sobre as premissas da inovação constante. Desde a sua génese, tanto na vertente militar, comercial ou das operações de tráfego geral, o fator tecnológico foi sempre um poderoso fator para atingir os níveis de segurança necessários para generalizar as operações em termos de aceitação pública, economia e impacto no desenvolvimento da sociedades modernas (AIRSPACEMAG, 2018).

No entanto, vive-se uma era de transmutação total da aviação civil. Enquanto que a navegação aérea tripulada desenvolveu-se e proliferou nos últimos 100 anos através do aumento constante dos requisitos aplicáveis em termos de qualidade de construção, tecnologia, fatores humanos e procedimentos, sustentada pelo desenvolvimento de da gestão da operação através da gestão holística do risco (UE 2018/1139, Artigos 55º a 58º) (UE 2019/947, Artigo 5.º), a navegação aérea não tripulada apareceu na aviação civil como um bem substituto e uma opção natural face aos rápidos desenvolvimentos tecnológicos.

Figura 1 – Benefícios das operações de aeronaves não tripuladas e da integração das operações no espaço aéreo através do U-space

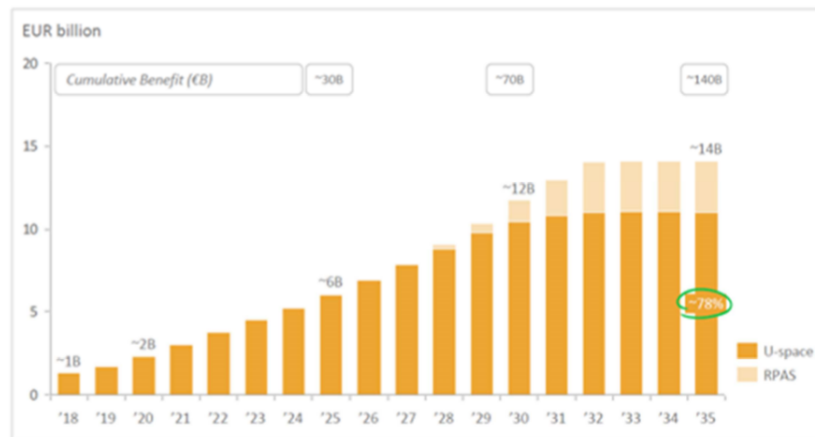


Fonte: European ATM master Plan drone roadmap

Este tipo de operações, tanto na vertente comercial como na vertente lúdica, potencialmente podem gerar um valor de mercado na ordem dos 5.2 biliões de euros no

espaço económico Europeu (Single European Sky ATM Research [SESAR], 2016), considerando apenas as operações de aeronaves não tripuladas abaixo dos 25kg de peso máximo à decolagem.

Figura 2 – Benefícios a longo prazo do U-space



Fonte: European ATM master Plan

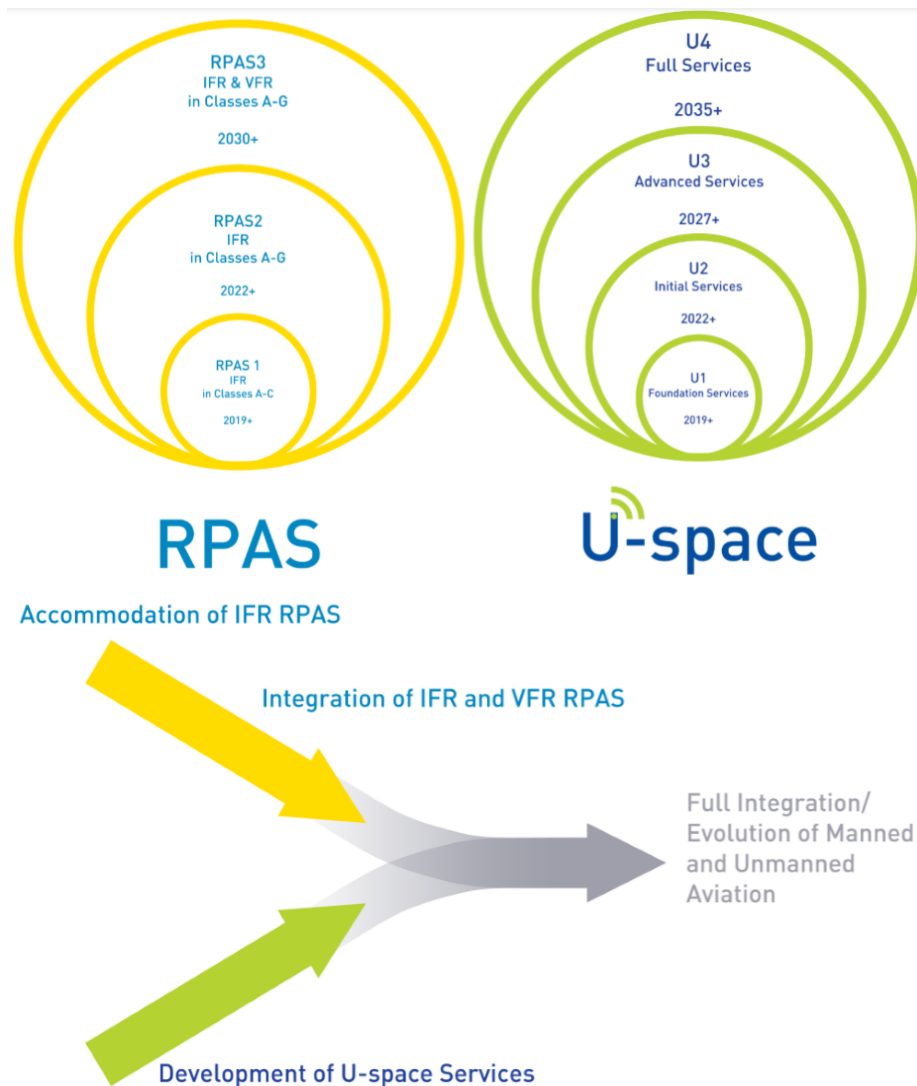
As operações de aeronaves pilotadas remotamente não são propriamente uma novidade e a sua génese é anterior ao primeiro voo dos irmãos Wright. A primeira utilização de aeronaves não tripuladas conhecida é essencialmente militar e remonta ao século 18. No entanto estas operações apenas desenvolveram-se como operações civis na última década. A regulação do mercado, face ao número crescente das operações com riscos para a aviação tripulada, optou pela integração das operações. A execução de uma integração no espaço aéreo requiere, para efeitos de gestão no espaço aéreo e de segurança, que conceitos como a separação mínima a aplicar sejam introduzidos e eventualmente definidos para as categorias de operação (UE 2019/947, Artigo 3.º), da mesma forma que de forma análoga já existe para as aeronaves tripuladas em termos de regras e procedimentos (International Civil Aviation Organization [ICAO], 2011, p.69)¹. Ainda não existe um método claro de qual a separação a aplicar, nem qual a RWCL mínima e as contingências em caso de RWCL. O esboço do quadro regulatório atual aponta para que a solução é tecnológica² (European Organisation for Civil Aviation Equipment

¹ ICAO Doc. 4444 contém o capítulo das separações a aplicar pelo ARC. O Doc. 9863 ACAS Manual contém a operação e informações do ACAS para assegurar separações quando não é assegurado as separações aplicadas pelo ATC (LoWCL) de acordo com o Doc. 4444.

² A EUROCAE, através do grupo de trabalho 105 está a propor sistemas 'Detect And Avoid' (DAA) baseados nas especificações mínimas de performance e soluções tecnológicas para os serviços UTM, no entanto estes sistemas ainda não estão no mercado.

[EUROCAE], 2019a) estando também dependente dos serviços a serem prestados às aeronaves não tripuladas³.

Figura 3 – Plano de integração das aeronaves não tripuladas no espaço aéreo através do desenvolvimento do U-space e dos serviços associados



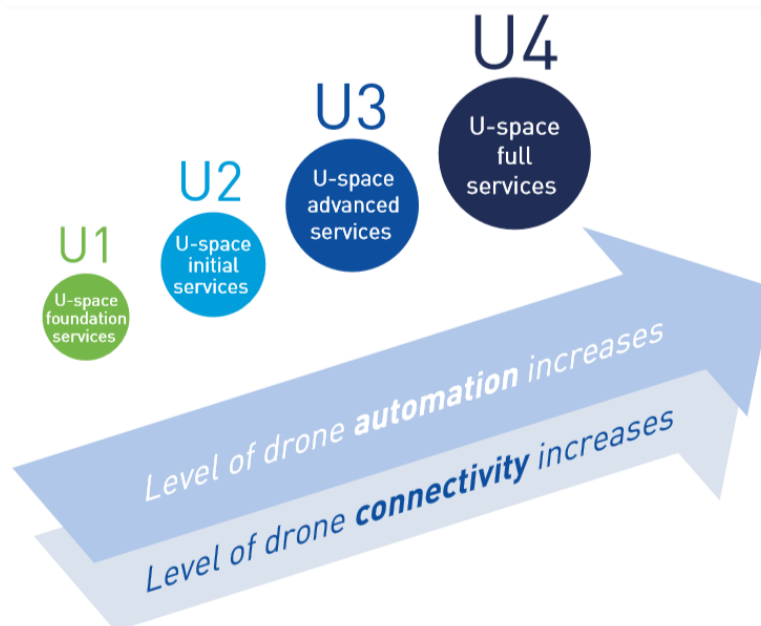
Fonte: 'European ATM master Plan'

Os benefícios económicos e os proveitos destas operações na sociedade, obrigam portanto que sejam desenvolvidos estes métodos de forma a possibilitar o acesso destas aeronaves em ambiente complexos cujo o risco no ar é muito elevado, aumentando assim a cobertura destas atividades. Apesar de não fazer parte do estudo, poderá também existir uma componente de otimização, pois conhecendo-se o local de risco mais elevado onde

³ A EASA já está a trabalhar no esboço da opinião a ser publicada em 2020 relativa ao U-space, aos serviços a serem prestados e aos métodos para separar tráfego em conflito.

ocorrem as trajetórias reais de aeronaves tripuladas, é possível planear rotas mais eficientes para as aeronaves não tripuladas nesse ambiente de grande complexidade⁴.

Figura 4 – Plano de implementação dos serviços UTM



Fonte: 'SESAR Blue Print roadmap for UAS integration'

Considerando que não existe um método específico estabelecido para assegurar a WCL entre aeronaves não tripuladas e não tripuladas, é importante conceptualizar várias soluções que permitam estabelecer um método RWCL, e se possível com o dinamismo ora referido, de forma a garantir a otimização do uso do espaço aéreo, principalmente no espaço aéreo controlado, onde as aeronaves tripuladas efetuam manobras de aterragem e descolagem.

⁴ Os Estados têm regulado localmente impedido o acesso a determinada zonas proibidas, no entanto essas zonas impossibilitam o florescimento de operações e tirar partido económico. Vide o Anexo ao Regulamento da ANAC n.º 1093/2016, de 14 de dezembro.

2.1.2 – Das primeiras operações à atualidade

O primeiro veículo não tripulado patenteado data de 23 de fevereiro de 1863, tendo sido registado por Charles Perley no U.S. ‘patent office’ de Nova Iorque. Este imaginou uma aplicação militar de balões de ar quente com um alçapão que abriria e libertaria uma carga de explosivos através da abertura de um alçapão acionado por um relógio ou outro dispositivo (AIRSPACEMAG, 2018). Nicolas Tesla foi o primeiro a obter aprovação de uma patente relativa ao controlo remoto de veículos, datada de 8 de novembro de 1898 com o n.º US613809 (Tesla, 1898)⁵, sem definir especificamente a sua aplicação. No entanto, a aplicação militar sempre foi a força motriz para o desenvolvimento da tecnologia relativa a este tipo de operações.

Os projetos de operação envolvendo aeronaves não tripuladas de grandes dimensões, apesar das reconhecidas potencialidades estratégicas, acabariam por ser abandonados ou negligenciados até à segunda guerra mundial, principalmente devido aos problemas associados ao ‘C2 Link’ e ao controlo dos voos e automatismos, resultando em perfis de voo ortogonais erráticos e inconsistentes com o planeamento operacional traçado. Cumulativamente a este desenvolvimento, desde os primórdios da aviação assistiu-se ao natural aparecimento dos UAS de pequenas dimensões sobre a forma de aeromodelos, catapultado pelo desenvolvimento tecnológico de miniaturização de motores e suas partes, bem como à tecnologia de controlo por ondas rádio à linha de vista. Este tipo de operações eram essencialmente lúdicas face à limitação da propagação das ondas rádio, no qual o comando e controlo das superfícies destas aeronaves de pequena dimensão estava limitado à linha de vista rádio.

O aeromodelismo desenvolveu-se no último século sem um impacto negativo nas operações de aeronaves tripuladas, sendo efetuado sobretudo em sede de associativismo nas quais as boas práticas (UE 2018/1139, ponto 34.º) de os melhores ‘designs’ de construção eram partilhados pelos demais. Aliado ao associativismo, esta prática desportiva sempre foi confinada a locais específicos, com uma geografia de voo bem

⁵ A primeira patente tinha um carácter generalista e não referia diretamente ao controlo de aeronaves, pois ainda não existiam operações de aeronaves mais pesadas que o ar. O termo lato ‘*vessels*’ de carácter mais generalista foi utilizado.

definida e afastada dos demais utilizadores do espaço aéreo, portanto, segregada das operações aéreas tripuladas⁶.

Após a segunda guerra mundial e até aos dias de hoje, assistiu-se a um desenvolvimento de toda a tecnologia relacionada com as operações de aeronaves não tripuladas de grande dimensão, principalmente das operações além da linha de vista e em voo automático. A entrada na era da computação através da miniaturização, o aumento da capacidade de processamento, o desenvolvimento da rede de telecomunicações globais, das constelações de satélite e a necessidade de esforço de guerra para estabilizar certas regiões, permitiu às forças militares, nomeadamente a USAF e à Marinha dos E.U.A, obter os devidos recursos financeiros e desenvolver com êxito programas de aeronaves não tripuladas pilotadas remotamente. A primeira operação militar com aplicabilidade civil e operada remotamente surgiu em 1955 com o aparecimento das operações de reconhecimento e vigilância perpetuadas pelo Northrop Radioplane RP-71 Falconer, um drone lançado através de motores de combustão e recolhido por meio de paraquedas.

Na década de 1960 a 1970 a USAF usou o RPA de reconhecimento AQM-34 em missões no Vietname, China e União Soviética. Durante a década de 1970 e finais de 1980 Israel assumiu-se como uma potência no desenvolvimento de RPAS, no qual se destaca o RQ-2 Pioneer, tendo este último acumulado horas de voo significativas na Guerra do Golfo. O UA que se tornou a epítome do desenvolvimento tecnológico foi sem dúvida o RQ-4 Global Hawk, que através da sua performance em voo e da transmissão de dados a taxas elevadas nos *links* de comunicação permitem o controlo remoto das superfícies com tempos de resposta elevados, baixas latências e com vários sistemas redundantes, destacando-se ainda a capacidade para captar e processar vídeo de alta resolução e integração parcial no mecanismo '*feedback-loop*'. dos serviços de gestão de tráfego aéreo atuais.

Atualmente, tem-se assistido a um crescimento acentuado das operações de aeronaves não tripuladas. Este crescimento foi notório na última década, abandonando-se

⁶ O Regulamento de execução (EU) 2019/947 permitirá que estas operações ocorram da mesma forma, no entanto devido aos baixos requisitos técnicos provavelmente não poderão operar nas zonas geográficas referidas no art.º 15.º do mesmo normativo, logo fora de espaço aéreo de grande complexidade, não sendo portanto relevantes para o estudo, apesar de também serem consideradas operações de aeronaves não tripuladas.

a aplicação puramente militar, primeiro numa vertente de lazer centrada no ‘gadget’ tecnológico, e posteriormente, face à versatilidade dos UAS de baixo peso e fácil operação, nas atividades comerciais (Washington Post, 2013), destacando-se as operações de assistência a missões de busca e salvamento, vigilância, monitorização, cartografia, topografia, fotografia e transporte. A entrada na era da digitalização e o acesso à tecnologia de vanguarda a preços competitivos possibilitou o rápido desenvolvimento das construções e a sua disponibilização no mercado.

A massificação das operações no espaço aéreo agitou os paradigmas instituídos quanto à segurança das operações de transporte aéreo civis no espaço aéreo. Até à última década do século passado as operações de aeronaves não tripuladas eram diminutas, integradas no espaço aéreo atípico, de cariz essencialmente militar, e apenas realizadas em cenários de guerra, portanto, isentas da aplicabilidade da convenção de Chicago, dos seus Anexos e da Regulamentação Europeia Harmonizada que surgiu com a adoção dos Regulamentos do Céu Único Europeu.

As operações de aeronaves não tripuladas operadas por civis estiveram sempre enquadradas como uma atividade perigosa para a aviação (ICAO, 2018, p.43)⁷, logo sujeitas a regulamentação a um nível baixo através da autorização e limitação da operação a um volume operacional definido publicado no pacote integrado de informação aeronáutica, de acordo com o risco para os demais utilizadores do espaço aéreo.

2.1.3 – O estado atual

A acessibilidade da tecnologia e aumento do número de operações, por exemplo, de ‘quad-copters’, mas não exclusivamente, está portanto a despoletar a elaboração acelerada de regulamentação específica de forma a permitir alocar estas operações no espaço aéreo, e na tentativa de integrá-las (Mueller, 2017) em segurança e harmonia com os demais utilizadores e respetivos prestadores de serviços ATM/ANS (SESAR, 2017a)⁸ (SESAR, 2017b)⁹.

⁷ Anexo 15 da ICAO.

⁸ SESAR ‘ATM Master Plan’ 2017.

⁹ SESAR ‘U-space blue print’.

Apesar de estar neste momento a ser introduzida regulamentação comum, tanto a nível da ICAO (ICAO, 2011a) (ICAO, 2015)¹⁰ (ICAO, 2017)¹¹ como a nível Europeu, destacando-se o Regulamento (UE) 2018/1139, os regulamentos delegados e de execução baseados no Art.º 57º e 58.º do mesmo diploma (EU 2019/947, 2019) (EU2019/945, 2019), essa integração só será possível se existir um conhecimento profundo de caracterização e reconhecimento da dinâmica do espaço aéreo atípico¹² onde não operam frequentemente aeronaves tripuladas, bem como a previsibilidade das trajetórias destas aeronaves nos diferentes estados na final curta e após a descolagem de uma pista. É importante assegurar o desenvolvimento de modelos simples que possam ser facilmente integrados e processados pela aeronave não tripulada e todo o sistema que a suporta a tempos de latência muito baixos¹³.

As aeronaves não tripuladas que operam no espaço aéreo atípico abaixo dos 500' acima da superfície do solo, são maioritariamente efetuadas por drones a rotor com peso máximo à descolagem inferior a 25Kg, muito limitados em termos de tecnologia com padrão aeronáutico, principalmente devido à incapacidade de embutir componentes adicionais na construção sem aumentar o peso das baterias. Mais tecnologia representa um maior consumo energético que se traduz numa necessidade de aumento do peso das baterias de forma a assegurar uma autonomia razoável.

Este é um fator que limita o acesso destas operações ao espaço aéreo controlado nas proximidades de infraestruturas aeronáuticas, nomeadamente de aeroportos com elevado fluxo de tráfego.

A integração das aeronaves não tripuladas referidas neste espaço aéreo está dependente do desenvolvimento de sensores e sistemas apropriados ou miniaturização de equipamentos comumente usados na aviação tripulada, destacando-se os sistemas específicos 'Detect and Avoid' (Santiago, 2015) (EUROCAE, 2019a), Transponder

¹⁰ 'Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS)'.

¹¹ 'Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) Concept of Operations (CONOPS) for International IFR Operations'.

¹² O espaço aéreo atípico, tal como definido no SORA da JARUS e no GM ao AMC1 do art.º 11.º do Regulamento de Execução (UE) 2019/947, como o espaço aéreo onde normalmente não voam aeronaves tripuladas. Cruzando com as altitudes mínimas de voo referidas no Regulamento de Execução (UE) 923/2012, poderá definir-se como o espaço aéreo abaixo dos 500' (150m) da superfície do solo.

¹³ A latência de sinal, num processo de comunicação entre duas máquinas, traduz-se pelo tempo que o sinal demora a ser recebido por uma máquina desde a sua emissão, processado e enviado para outra máquina. Esta latência pode ser afetada de diversas formas tal como falta de cobertura de sinal ou inexistência de linha de cobertura rádio causada por obstáculos artificiais ou naturais..

Modo S, ADS-B e ACS/TCAS (Kochenderfer, 2011), que serão usados cumulativamente com os serviços UTM (Larrow & Johnson, 2016) (AIRMAP, 2018) para assegurar a integração com elevados padrões de segurança e confiança no futuro *U-space* (European Aviation Safety Agency [EASA], 2018)¹⁴.

Apesar de estarem a ser desenvolvidos estes sensores, sendo de conhecimento que os serviços para aeronaves não tripuladas serão uma realidade num futuro próximo, nomeadamente o serviço de informação de voo, podem existir outras soluções que não requeiram a introdução de mais componentes eletrónicos e gasto de energia, por exemplo através de software, desde que seja de conhecimento e embutida informação relativa ao local específico onde a probabilidade de encontro resultante dos dados das trajetórias é elevada¹⁵. Os serviços para aeronaves não tripuladas dependerão da existência de um espaço aéreo não tripulado, das zonas geográficas com restrições e do fluxo dinâmico de informação entre os participantes, com o objetivo de permitir a operação integrada com um elevado grau de segurança, permitindo uma separação efetiva através da garantia de WCL entre as aeronaves a evoluir numa determinada zona do espaço aéreo.

Figura 5 – Exemplo de um modelo esquemático do tipo de variáveis e parâmetros usados para definir uma WCL para uma aeronave não tripulada

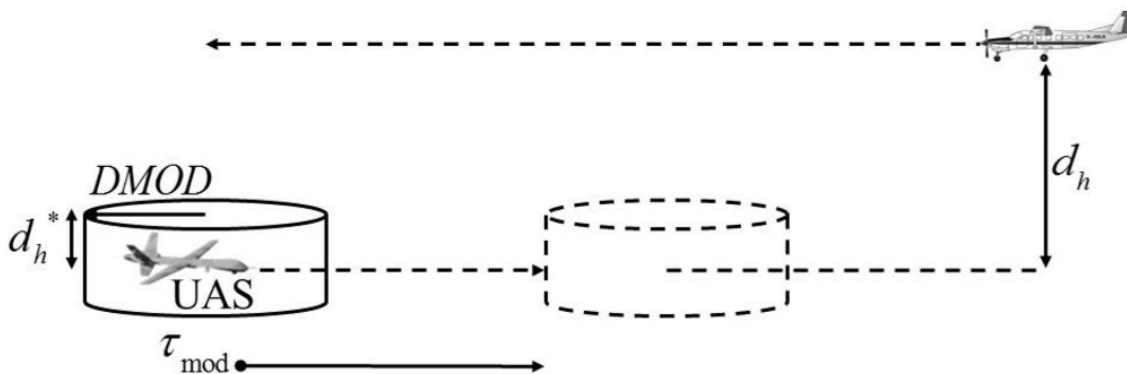


Figure 1. *Schematic of the types of variables and parameters used to define UAS well clear (side view, not drawn to scale, HMD not illustrated)*

Fonte: Thipphavong et al., 2017

¹⁴ EASA 'New Regulatory Framework for UAS'.

¹⁵ O esboço regulatório acelerado do U-space da EASA, RMT 'Rule Making Task', 2019, contem os serviços a serem prestados aos operadores de UAS. O esboço inclui uma descrição do método que tem de ser assegurado para passar pacotes de informação relativa à posição das aeronaves tripuladas que possam estar em risco face à operação de um UAS, bem como as regras de prioridade, sem nunca definir uma WCL.

2.2 – Métodos de Separação

2.2.1 – Métodos baseados nos serviços ATM atuais

Atualmente, a separação entre aeronaves no espaço aéreo controlado é assegurada pelos serviços de tráfego aéreo. A separação é efetuada tendo em conta o tipo de serviço a ser prestado em determinado bloco de espaço aéreo (ICAO, 2007, p. 69). Os serviços que podem ser prestados são (ICAO, 2007, p.47):

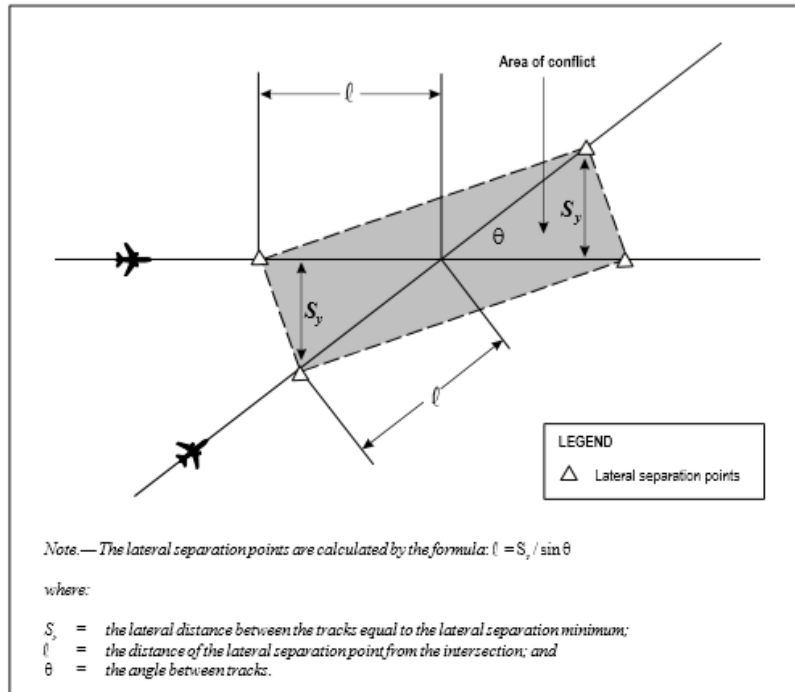
- Serviço de controlo de área;
- Serviço de controlo de aproximação;
- Serviço de controlo de torre.

No serviço de controlo de controlo de área, é prestado um serviço de separação horizontal e vertical no qual são usadas métodos baseados em estimas e reportes dos pilotos, ou caso a área tenha cobertura em radar primário, secundário ou outros tipos de cobertura baseada no equipamento, tal como ADS-B. Podem também ser usados dados de várias fontes para produzir um resultado de ‘multilateration’¹⁶ com o objetivo de monitorizar e garantir as separações, especialmente em zonas sem cobertura de radar primário e secundário.

Os serviços de controlo de tráfego aéreo, normalmente prestados abaixo dos 3000’ são o serviço de controlo de aproximação e o serviço de controlo de torre.

¹⁶ ‘Multilateration’ é uma técnica navegação e de vigilância baseada na medida do tempo estimado de chegada das ondas de energia ao qual se conhece a velocidade de propagação. A técnica permite estimar de forma aceitável a posição de uma aeronave com o objetivo de efetuar a vigilância e aplicar a separação em áreas com pouca ou sem cobertura radar.

Figura 6 – Técnica de separação lateral baseada no conhecimento da área de conflito

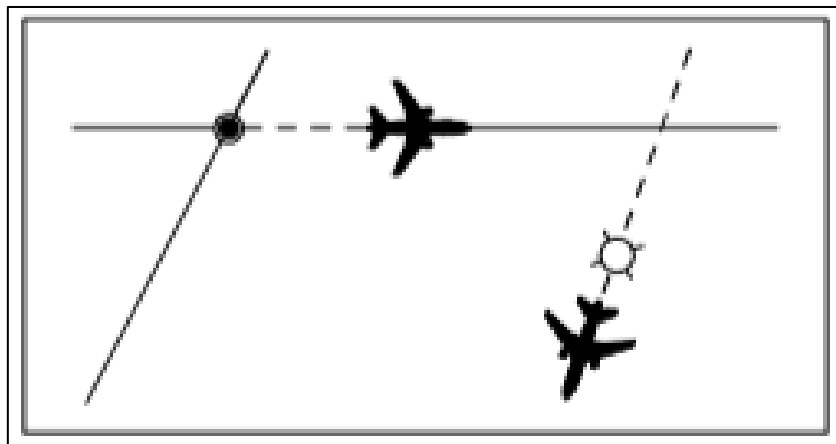


Fonte: ICAO Doc. 4444, 2007, p. 76 (Figure 5-5, 5.4.1.).

O controlo de tráfego aéreo de torre aplica a separação de aeronaves reduzida (ICAO, 2007, p. 111)¹⁷ através de um método visual (ICAO, 2007, p. 72) (ICAO, 2011, p. 129) conjugado com outros procedimentos específicos, instruindo as mesmas a efetuar determinadas manobras e a fluir por determinados pontos de reporte (ICAO, 2007, p. 72), pontos de entrada, pontos de saída (ICAO, 2007, p. 60) circuitos, rotas, altitudes (ICAO, 2007, p. 56.), reduzindo ou aumentando as velocidades (ICAO, 2007, p. 55), aplicando também separações em tempo baseadas no rasto de turbulência (ICAO, 2007, p. 57) com o objetivo de assegurar uma WCL, contribuindo assim para a segurança das operações. Considerando a dimensão das aeronaves não tripuladas operadas atualmente no mercado, este tipo de separação não é indicado devido à dificuldade de manter o contato visual.

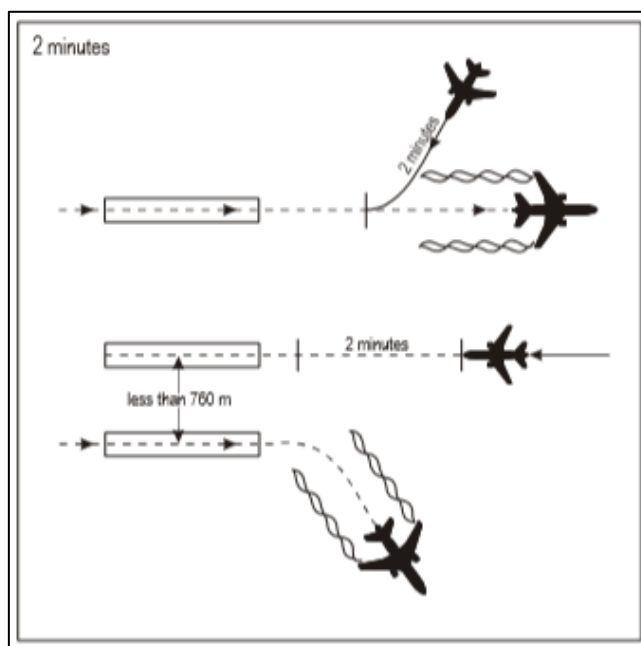
¹⁷ ICAO Doc. 4444 'Air Traffic Management'.

Figura 7 – Exemplo de separação baseada pontos geográficos



Fonte: ICAO Doc. 4444, 2007, p. 74 (Figure 5-1, 5.4.1).

Figura 8 – Exemplo de separação em tempo baseada no rasto de turbulência



Fonte: ICAO Doc. 4444, 2007, p. 108 (Figure 5-43, 5.8.4.).

O controlo de tráfego aéreo de aproximação, efetua as separações referidas no parágrafo anterior baseado em técnicas dependentes do reporte dos pilotos a determinados pontos ou rádio ajudas à navegação, ou da distância e posição em relação a esses pontos ou rádio ajudas. Ou seja não usa técnicas visuais. Adicionalmente, podem também aplicar

separações baseadas em sistemas de vigilância radar, desde que possuem os equipamentos necessários (ICAO, 2007, p. 151)¹⁸.

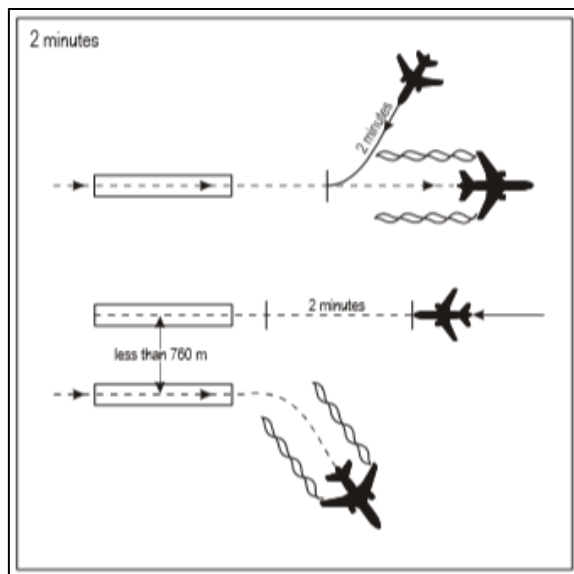
Os serviços de separação através de vigilância são introduzidos sempre que a procura de tráfego cause um aumento da complexidade no bloco de espaço aéreo onde esses serviços estão a ser prestados. Este tipo de serviço permite aumentar a capacidade e a eficiência (ICAO, 2007, p. 154), bem como assegurar uma distância de separação horizontal reduzida entre aeronaves, levando a que as operações continuem a ocorrer com um elevado grau de segurança.

Atualmente, com a vulgarização dos sistemas SSR, ADS-B e MALT, cada vez mais o método depende dos equipamentos a bordo das aeronaves que permitam a troca de informação com as estações em terra. Os equipamentos em questão, nomeadamente os Transponders e o ADS-B, devido a robustez que necessitam de ter para serem usados, podem não ser apropriados a aeronaves não tripuladas pequenas face ao peso de tais componentes bem como ao consumo energético dos mesmos no sistema. Adicionalmente, o serviço de controlo de aproximação carece de comunicações bilaterais com os pilotos de forma a serem passadas de forma expedita instruções que garantam a separação das aeronaves. As separações através dos sistemas de vigilância é de 5NM (ICAO, 2007, p. 67) podendo ser reduzida a 3NM ou 5.6 Km, dependendo de determinados critérios referidos no documento de gestão de tráfego aéreo (ICAO, 2007, p. 167).

Assegurar uma separação horizontal de 5.6 Km entre uma aeronave não tripulada de pequenas dimensões e uma aeronave tripulada, em espaço aéreo controlado, parece ser desproporcional considerando que tanto a autonomia como a velocidade são muito reduzidas comparando com as aeronaves tripuladas.

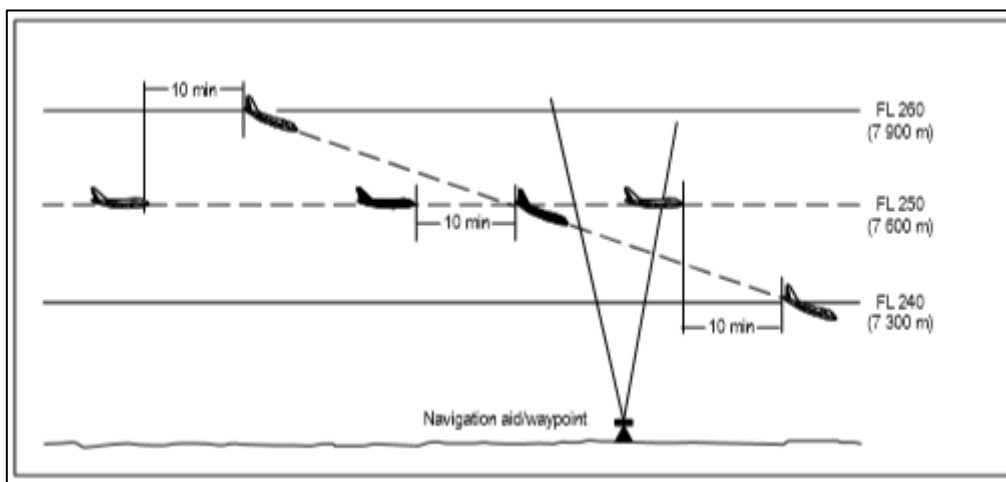
¹⁸ Os sistemas de vigilância usados nos serviços de tráfego aéreo são aqueles baseados em Radar Primário, radar secundário (SSR), ADS-B e MLAT.

Figura 9 – Exemplo de separação horizontal baseada em distância através de rádio ajudas (VOR)



Fonte: ICAO Doc. 4444, 2007, p. 74.

Figura 10 – Exemplo de separação longitudinal de uma aeronave em descida e outra a manter o nível, baseada em tempo através de um fixo de uma rádio ajuda



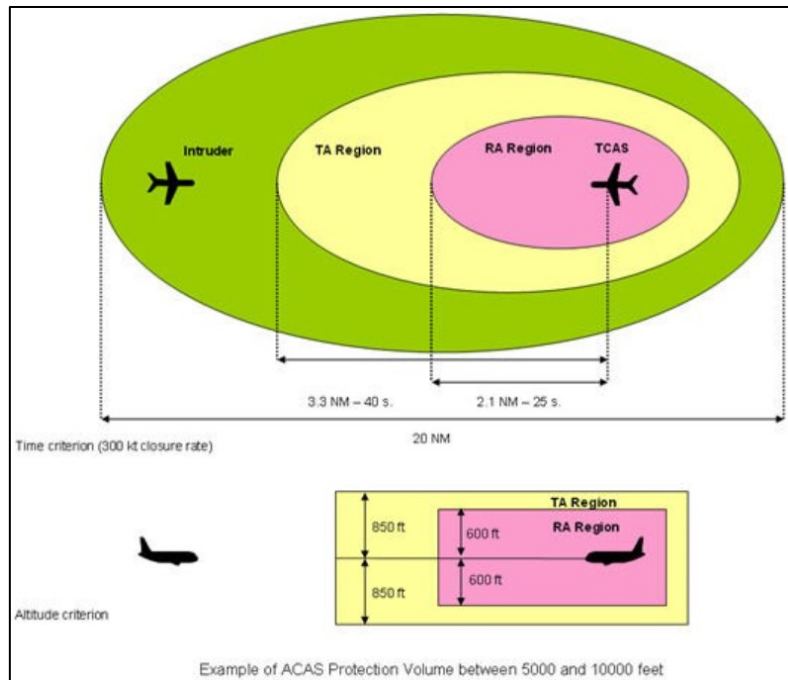
Fonte: ICAO Doc. 4444, 2007, p. 74.

2.2.2 – Métodos baseados nas regras do ar e nos equipamentos abordo para garantir uma WCL

As aeronaves tripuladas que operam no espaço aéreo controlado estão equipadas com sistemas que permitem, caso ocorra uma quebra de separação por falha na aplicação dos procedimentos por parte do controlo de tráfego aéreo, a deteção de uma aeronave em conflito, através da emissão de alertas e instruções para garantir que a LoWCL seja eliminada e a aeronave reponha o RWCL. Os sistemas ACAS/TCAS emitem portanto informação que permite ao piloto, alterar o rumo do voo de forma a evitar o conflito e evitar uma potencial colisão (ICAO, 2006b, p. 249). A responsabilidade de evitar a colisão é sempre do piloto da aeronave (EU 923/2012, SERA.3201)¹⁹. O sistema emite um sinal de informação 'TA, traffic advisory' e um com instruções 'RA, resolution advisory', que devem ser aplicadas pelo piloto de forma a garantir que a aeronave se mantém livre de conflito, portanto com o WCL garantido. O sistema ACAS é considerado um sistema passivo, baseado no transponder, de cobertura limitada. Os sistemas ACAS evoluíram para sistemas mais avançados, por exemplo o TCAS II, um tipo de ACAS II que possibilita uma série de funções adicionais (ICAO, 2006a, p. 143). O sistema funciona através de uma bolha de emissão no qual o sistema interroga outras aeronaves equipadas na vizinhança, portanto aptas para responder à interrogação, caso estejam a distâncias baseadas em tempo reduzidas. O sistema permite assegurar que mesmo ocorrendo uma LoWCL provocada pelos serviços de controlo de tráfego aéreo, os pilotos de aeronaves tripuladas são capazes de detetar essa LoWCL, tomar as ações apropriadas e assegurar uma RWCL.

¹⁹ O Regulamento de Execução (UE) 923/2012, vulgarmente conhecido por SERA (Regras do Ar), transpôs para o sistema legislativo Europeu o Anexo 2 da ICAO, entre outros.

Figura 11 – Exemplo do funcionamento de um sistema ACAS/TCAS II para garantir WCL



Fonte: Balanchadran et al., 2015, p.4

O sistema baseado em ACAS pode ser uma possível solução para garantir uma WCL entre aeronaves não tripuladas e não tripuladas. No entanto o sistema parece ser mais apropriado a aeronaves não tripuladas de grandes dimensões a voar a altitudes muito superiores. As aeronaves não tripuladas de pequenas dimensões, a operar abaixo das altitudes mínimas de voo em espaço aéreo controlado, caso equipadas com este sistema, e desconsiderando os problemas alcance da emissão devido à potência das baterias não ser suficiente, face à proximidade com aeronaves tripuladas, despoletariam RA's que teriam de ser seguidos por esta. O sistema não parece ser um garante de WCL e provavelmente causará ainda mais problemas num ambiente já por si complexo.

2.3 – Métodos de separação concetualizados para as aeronaves não tripuladas

2.3.1 – Sistemas baseado no equipamento

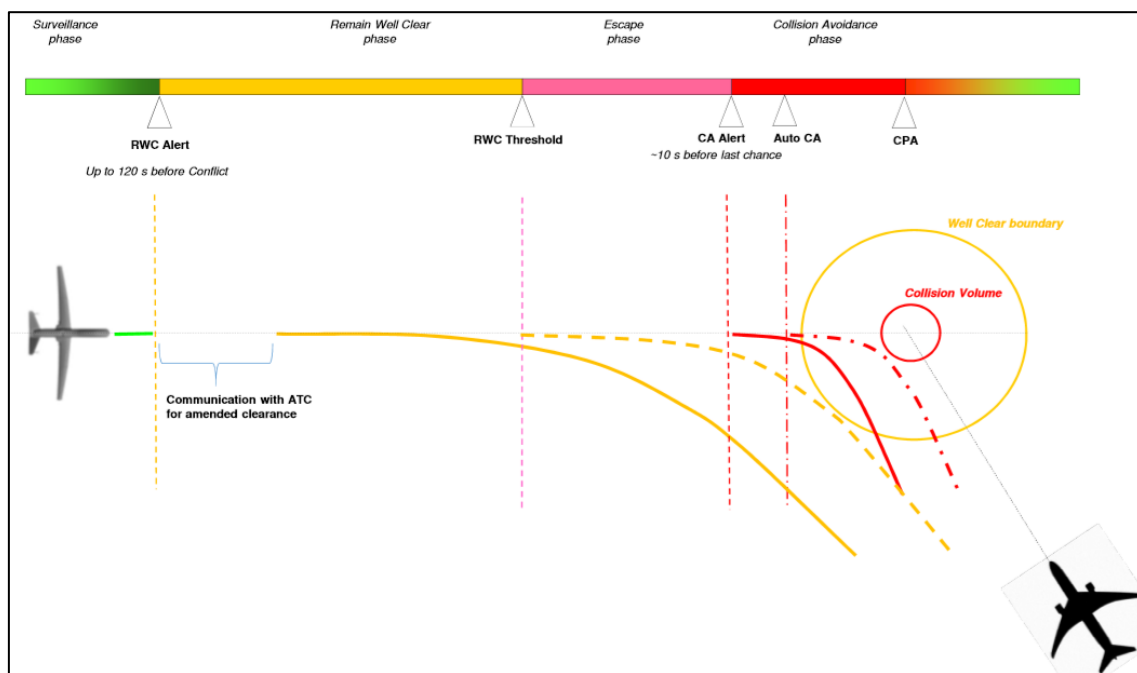
Ao momento apenas foi publicada apenas uma decisão relativa às especificações técnicas (EUROCAE, 2019b). Não existem ainda requisitos para as especificações de certificação da EUROCAE para a maior parte dos sistemas DAA, encontrando-se estes em uma fase de desenvolvimento muito embrionária²⁰. A nível de requisitos técnicos a documentação desenvolvida relativamente aos equipamentos DAA necessários para operar em espaço aéreo controlado integrado está em fase de esboço e não estão disponíveis ao público. Estes requisitos técnicos serão usados pelos fabricantes para construir os componentes necessários de forma a garantir a separação e manutenção da WCL das aeronaves não tripuladas em relação às aeronaves tripuladas durante as operações integradas. Contudo, os equipamentos operarão de acordo com o software desenvolvido para o efeito, pelo que a solução baseada no software poderá de alguma forma ser incluída como uma redundância para mitigar qualquer anomalia nestes equipamentos durante a operação.

A nível concetual, o sistema baseado no software permitirá criar rotinas semelhantes ao DAA com apenas dois conjuntos de dados táticos (posição histórica da trajetória 4D e a posição da trajetória estática), no qual a aeronave não tripulada usa a arquitetura do seu software para evitar as colisões. O desenvolvimento deste método a jusante, integrado em sistemas DAA, permitirá o desenvolvimento de sensores mais pequenos e com tempos de resposta mais elevados, de baixa iteração de informação nos componentes que perfazem a rede UTM (EUROCAE, 2019a) assegurando a

²⁰ A EUROCAE está a desenvolver as seguintes especificações de certificação para os seguintes sistemas DAA: ‘Minimum Aviation System Performance Standard for Detect and Avoid (Traffic) in Class A-C airspaces under IFR’, ‘Minimum Operational Performance Standard (MOPS) for Detect & Avoid [Traffic] in Class A-C airspaces under IFR’, ‘Minimum Aviation System Performance Standard for Detect & Avoid [Traffic] under VFR/IFR’, ‘Minimum Operational Performance Standard for Detect & Avoid [Traffic] under VFR/IFR’, ‘Minimum Operational Performance Standard for Detect & Avoid in Very Low Level Operations’, ‘Operational Services and Environment Description for Detect & Avoid in Very Low Level Operations’.

interoperabilidade do sistema²¹, e eventualmente possibilitar a RWLC dinâmica nas operações de aeronaves não tripuladas em espaço aéreo controlado, através do ajuste do perfil de voo face ao fluxo de tráfego em aproximação. Contudo, os sistemas DAA terão de receber e processar informação, pelo que suspeita-se que contribuirão negativamente para o peso total e a autonomia das aeronaves não tripuladas de pequenas dimensões, caso não seja encontrada uma solução mais centrada no software e dos componentes já usados.

Figura 12 – Funcionamento de um sistema DAA



Fonte: SAAB DAA Collision Avoidance for RPAS, 2017

Os sistemas DAA ainda não estão disponíveis no mercado mas serão essenciais para assegurar a WCL, especialmente em espaço aéreo não controlado onde não existirão serviços do U-space para aeronaves não tripuladas, portanto aeronaves não conetadas em uma rede com os devidos serviços para mitigar o risco de colisão no ar. As aeronaves não tripuladas de pequenas dimensões, já disponíveis no mercado, possuem sistemas de

²¹ A Agência Europeia para a Segurança da Aviação Civil (EASA) está a atualmente a desenvolver o esboço da opinião relativa ao espaço aéreo não tripulado e aos serviços obrigatórios que têm de ser prestados nesse espaço aéreo. O esboço refere quais os serviços mas não quais as soluções tecnológicas em termos de componentes e software.

navegação e de comando e controlo que a troca de informações operacionais essenciais para a navegação. A performance operacional dos sistemas de comando e controlo é essencial para assegurar a interoperabilidade eficiente no sistema ATM atual²² (Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems [JARUS], 2015, p. 3). Este sistema permite atingir as interações necessárias em voo ou através do uso de estações de comunicação e vigilância no solo, para efetuar uma operação segura e eficiente em qualquer fase da operação. O sistema depende da troca de informação de diversas fontes, e inclui a integração colaborativa baseada na comunicação, com os seguintes participantes, fontes ou componentes:

- Piloto remoto;
- Fontes de dados de informação aeronáutica;
- Serviços de gestão de tráfego prestados aos utilizadores (ATM);
- Sistemas tecnológicos existentes ou futuros, nomeadamente os sistemas DAA;
- Sistemas de navegação e vigilância.

Portanto, os canais de comunicação de 'C2 Link' já existentes, conjugados com o software embutido é essencial para navegação. Estes podem ser usados de forma a conceptualizar sistemas que garantam uma WCL efetiva, desde que também sejam garantidos tempos curtos de transação e partilha de informação, com o objetivo da continuidade, disponibilidade e integridade na aceitabilidade da qualidade das comunicações. As garantias e a integridade destes sistemas é essencial para assegurar que a taxa de acidentes causadas por uma aeronave não tripulada, incluindo situações de incidente aéreo por LoWCL, devido a falhas no equipamento é em termos de probabilidade o mais reduzida possível (JARUS, 2015, p. 30). Independentemente da solução para garantir a WCL, através dos sistemas DAA, do software ou por um sistema misto, provavelmente este tipo de solução irá requerer algum tipo de certificação desse

²² O Sistema ATM é aquele que efetua a gestão do tráfego aéreo tripulado. Os sistemas de comando e controlo devem também ter a performance apropriada e usar as funções em voo e no solo com o objetivo de assegurar a integração segura das operações no espaço aéreo.

sistema ou componente dependendo do risco de operação (EU 2019/947, Artigo 40.º), apesar de este não ser objeto da dissertação.

Tabela 1 – Parâmetros requeridos de performance das comunicações para a troca de pacotes de informação

C2 link RCP type	Transaction time (sec)	Continuity (Probability per flight hour)	Availability (Probability per flight hour)	Integrity (Acceptable rate per flight hour)
C2 link RCP A	3	0.999	0.9999	10^{-5}
C2 link RCP B	5	0.999	0.999	10^{-4}
...	15	0.999	0.999	10^{-4}

Fonte: JARUS, *RPAS C2 Link Required Communication Performance*²³

Os sistemas 'C2 Link' das aeronaves não tripuladas no mercado trocam pacotes de informação através de canais de comunicação wireless ou Bluetooth, nomeadamente a 2.4 GHZ, 5.8GHz, a 433MHz (École Nationale de l'Aviation Civile [ENAC], 2016, p.1) e na rede da banda móvel 3G e 4G. Estes sistemas têm um consumo elevado de energia, pelo que a operação contínua no canal afeta a autonomia dos equipamentos. A maior parte das aeronaves não tripuladas permitem que o voo seja planeado e embutido no software interno.

²³ Disponível no documento JARUS AMC.RPAS.1309, 2015.

Tabela 2 – Estudo quantitativo da disponibilidade e integridade de sistemas necessários para manter um voo seguro e aterragem (excluindo LoWCLE) dependendo da complexidade da aeronave

Aircraft Type	RPAS Complexity Level	Accident Rate (pfh) All Causes (Note 1&4)	% Due to Systems (10%) (Note 2)	Number of Potential Catastrophic Failure Conditions	Probability of a Catastrophic Failure Condition (pfh)
Manned CS-25		1×10^{-6}	1×10^{-1}	100 (10^{-2})	1×10^{-9}
RPAS CS-25	N/A (Note 3)	1×10^{-6}	1×10^{-1}	100 (10^{-2})	1×10^{-9}
Manned CS-29		1×10^{-6}	1×10^{-1}	100 (10^{-2})	1×10^{-9}
RPAS CS-29	N/A (Note 3)	1×10^{-6}	1×10^{-1}	100 (10^{-2})	1×10^{-9}
Manned CS-23 Class I		1×10^{-4}	1×10^{-1}	10 (10^{-1})	1×10^{-6}
RPAS CS-23 Class I	I	1×10^{-4}	1×10^{-1}	10 (10^{-1}) (Note 5)	1×10^{-6}
	II	1×10^{-4}	1×10^{-1}	100 (10^{-2}) (Note 6)	1×10^{-7} (Note 7)
Manned CS-23 Class II		1×10^{-5}	1×10^{-1}	10 (10^{-1})	1×10^{-7}
RPAS CS-23 Class II	I	1×10^{-5}	1×10^{-1}	10 (10^{-1}) (Note 5)	1×10^{-7}
	II	1×10^{-5}	1×10^{-1}	100 (10^{-2}) (Note 6)	1×10^{-8} (Note 7)

Manned CS-23 Class III		1×10^{-6}	1×10^{-1}	10 (10^{-1})	1×10^{-8}
RPAS CS-23 Class III	I	1×10^{-6}	1×10^{-1}	10 (10^{-1}) (Note 5)	1×10^{-8}
	II	1×10^{-6}	1×10^{-1}	100 (10^{-2}) (Note 6)	1×10^{-9} (Note 7)
Manned CS-23 Class IV		1×10^{-6}	1×10^{-1}	100 (10^{-2})	1×10^{-9}
RPAS CS-23 Class IV	N/A (Note 3)	1×10^{-6}	1×10^{-1}	10 (10^{-2})	1×10^{-9}
Manned CS-27		1×10^{-4}	No quantitative criteria defined		
RPAS CS-27	I	1×10^{-4}	No quantitative criteria defined (See Note following paragraph 11.3(i) above)		
	II	1×10^{-4}			
Manned CS-VLA		No data	No quantitative criteria defined (Note 8)		
RPAS CS-LUAS (Note 9)	I	1×10^{-4}	1×10^{-1}	10 (10^{-1})	1×10^{-6}
	II	1×10^{-4}	1×10^{-1}	100 (10^{-2}) (Note 6)	1×10^{-7} (Note 7)
Manned CS-VLR		No data	No quantitative criteria defined (Note 8)		
RPAS CS-LURS (Note 9)	I	1×10^{-4}	1×10^{-1}	10 (10^{-1})	1×10^{-6}
	II	1×10^{-4}	1×10^{-1}	100 (10^{-2}) (Note 6)	1×10^{-7}

Fonte: JARUS, 2015, pág. 30

O sistema permite assim que o voo seja efetuado de forma automática e sem a necessidade de saturar as larguras de banda com informação. O piloto remoto monitoriza a operação, e intervém sempre que seja necessário. Qualquer diminuição da quantidade de informação no canal de comunicação traduz-se em benefícios na autonomia da aeronave não tripulada. As condições de operação como um todo, se mal geridas, afetam a autonomia (Chen et al., 2018)²⁴. Um sistema baseado no software, para operações de aeronaves não tripuladas abaixo de 1000', usando os atuais canais de comunicação, caso seja evidenciado que é reduzida a probabilidade de falha que escalone em um risco real em termos de incidente ou acidente aéreo pela aeronave não, levará a uma maior confiança na robustez desse sistema funcional, permitindo assim validar as soluções baseadas no software. Independentemente do objetivo final, os sistemas DAA, o 'software e todos os outros componentes e módulos da aeronave não tripulada a funcionar em simultâneo, têm de garantir que o risco de colisão é sempre mantido a um nível baixo. É importante referir que a perda da capacidade DAA do equipamento pode ser um dos fatores para a LoWCL (JARUS, 2015, p. 37), pelo que a solução não pode ser exclusivamente no componente, mas sim no sistema, incluindo no seu software.

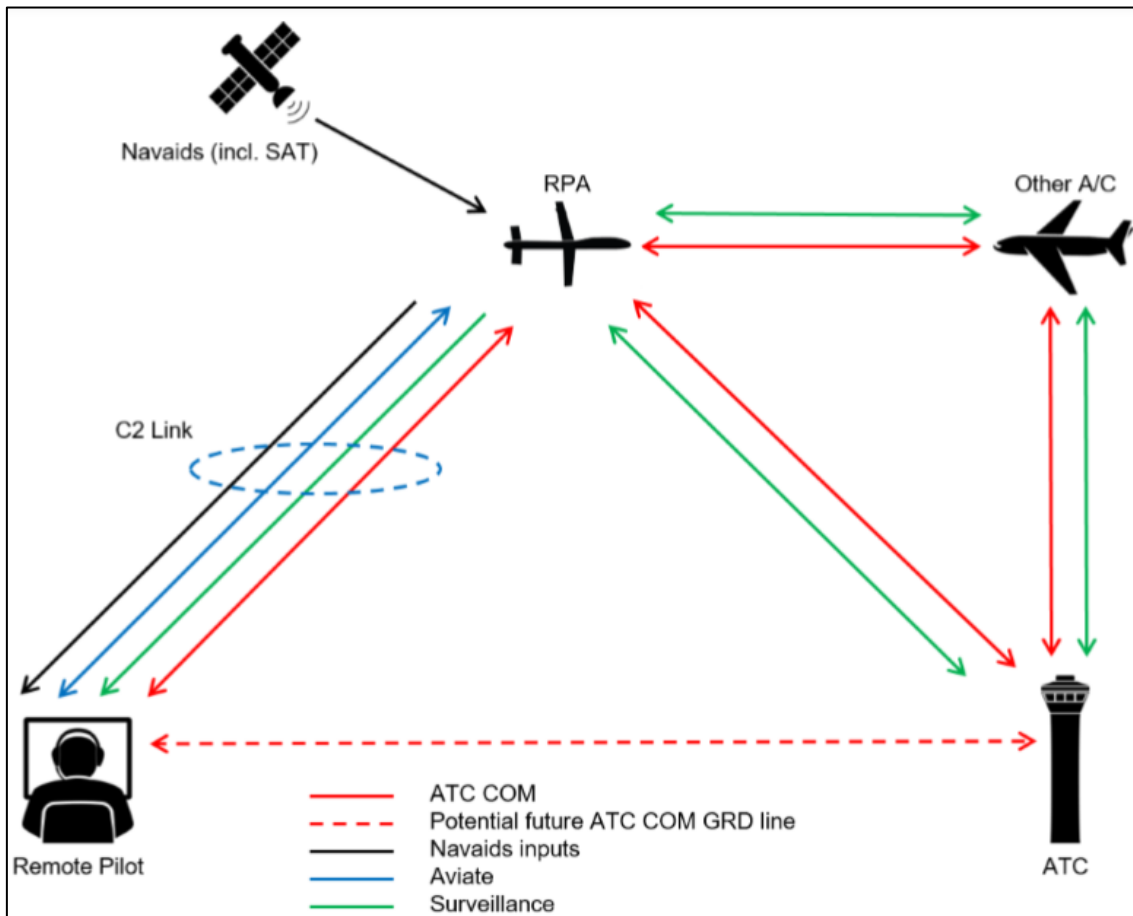
²⁴ Chen et al., 2018, efetuaram estudos para aferir as limitações da capacidade das baterias em aeronaves não tripuladas de pequenas dimensões com vários rotores. A capacidade e autonomia das bateria dependerá do planeamento (i.e. rota programada) da operação e da forma como será executada.

2.3.2 – Sistemas baseado no equipamento

Os prestadores de serviços a aeronaves não tripuladas irão futuramente prestar serviços aos operadores de aeronaves não tripuladas. Esses serviços são essências para garantir que são seguidos os procedimentos de suporte desenhados especificamente para permitir o acesso ao espaço aéreo de forma segura e eficiente. O ‘U-space’ permitirá a existência de uma interface entre os operadores de aeronaves não tripuladas e a aviação tripuladas, os prestadores de serviços ATM/ANS e às autoridades competentes. Estes serviços são de apoio às missões, logo permitirão a operação integrada no espaço aéreo, assegurando a separação adequada de acordo com o ambiente (SESAR, 2017). Os serviços incluirão a assistência ao planeamento e gestão das operações de aeronaves não tripuladas e até a monitorização local e em rede. O objetivo dos serviços do ‘U-space’ é assegurar a integração, através da mitigação dos riscos no ar. Concretamente, os serviços são uma forma de garantir a separação das operações no mesmo espaço aéreo, pelo que para atingir esse objetivo as aeronaves não tripuladas devem estar ligadas em rede nesse

espaço aéreo através dos canais de comando e controlo 'C2 Link'. A solução requer software interoperável, pelo que, futuramente quando os serviços estiverem disponíveis a solução de garantir a separação baseada no software poderá ser uma realidade.

Figura 14 – Modelo semântico da troca de pacotes de informação nas operações UAS



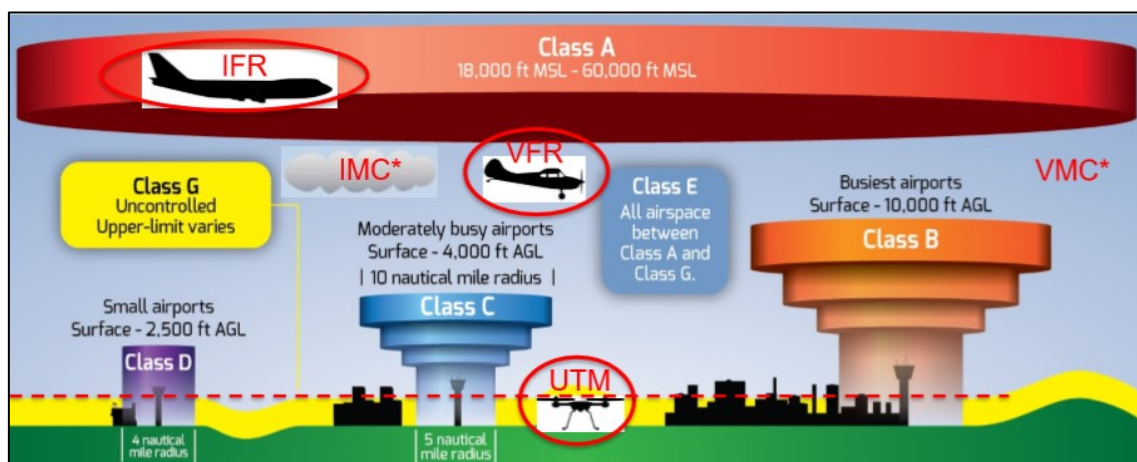
Fonte: ICAO RPAS CONOPS

Estes serviços, na fase U2 designados por 'U-space initial services', asseguram que de alguma forma será sempre mantida uma WCL aceitável, através da submissão de um plano de voo, da aceitação do mesmo pelos prestadores de serviços de tráfego aéreo, e de acordo com a informação dinâmica do espaço aéreo²⁵. Portanto, o U-space, de acordo

²⁵ O 'U-space' requer a existência de interfaces formais com os prestadores de serviços ATM/ANS de forma a definir os métodos que sejam o garante da segurança, bem como introduz a necessidade do uso de informação dinâmica com o objetivo de aumentar a eficiência do espaço aéreo.

com a informação dinâmica relativa ao espaço aéreo, nomeadamente da ativação de reservas de espaço aéreo, zonas de exclusão, aumento e/ou diminuição de complexidade, irá instruir taticamente os operadores que usam os seus serviços de forma a garantir que estes mantenham a separação adequada de outras aeronaves e de determinadas zonas do espaço aéreo adjacente. Os serviços do espaço aéreo não tripulado ainda estão a ser desenvolvidos, no entanto quando formulados será necessário garantir que estão suficientemente maduros antes de aplicá-los a todo o espaço aéreo. Numa fase inicial o espaço aéreo não tripulado, será provavelmente constituído a VLL, ou seja a altitudes muito baixas²⁶.

Figura 15 – Representação semântica da organização do espaço aéreo e do U-space onde serão prestados os serviços UTM



Fonte: Jarrete & Johnson, NASA

Com o objetivo de assegurar a interoperabilidade funcional de acordo com as normas europeias (CE 552/2004, Artigo 3.º) os sistemas de comunicação e de auxílio à navegação, incluindo os componentes DAA a bordo de aeronaves não tripuladas devem ser interoperáveis com os componentes da rede, em particular com os componentes de comunicação dos prestadores de serviços no U-space. As especificações técnicas para

²⁶ Altitudes muito baixas são aquelas abaixo das alturas do SERA Regulamento de Execução (EU) 923/2012, e normalmente conhecidas pelo acrónimo na língua inglesa VLL, 'Very Low Level'.

estes componentes, para serem utilizados pelos prestadores de serviços UTM, estão ainda a ser elaborados pelo grupo WG-105 SG 31 (EUROCAE, 2019a).

CAPÍTULO 3: DESENVOLVIMENTO

3.1 – O quadro regulatório

As operações de aeronaves não tripuladas tem aumentado significativamente nos últimos anos, devido à sua versatilidade a conduzir operações comerciais civis, mas também pelos custos e investimentos associados. O ‘European ATM Master Plan’ (SESAR, 2017) refere a importância e urgência em implementar um processo de integração, com o objetivo de aumentar a segurança mas também devido ao impacto económico destas operações. O SESAR conceptualizou o plano de integração até 2035, através da introdução faseada de serviços ajustados ao desenvolvimento da regulamentação e da tecnologia (SESAR, 2017).

A Comissão Europeia decidiu, em 2016, iniciar o processo regulatório relativo à marcação de conformidade e dos operadores de países terceiros bem como das regras aplicáveis à operação de aeronaves não tripuladas, estando estas consubstanciadas no Art.º 57.º e 58.º do Regulamento (EU) 2018/1139, de 16 de março de 2018. As atas delegadas e de execução iniciam o processo de integração, na fase U1, tendo estas últimas sido publicadas em Jornal Europeu no dia 11 de junho de 2019 (UE 2019/947) (UE 2019/945). Contudo, quanto à aeronavegabilidade não existem ainda requisitos relativos ao projeto, fabrico e manutenção bem como às especificações de certificação relativos a hélices, aos motores, aos componentes e equipamentos instalados necessários para atingir as fases seguintes, em parte porque estes ficam fora do âmbito de certificação, exceto se essa certificação provir da Agência Europeia para a Segurança da Aviação (UE 2018/1139, Artigo 77.º).

3.2 – As categorias de operação e a integração no espaço aéreo

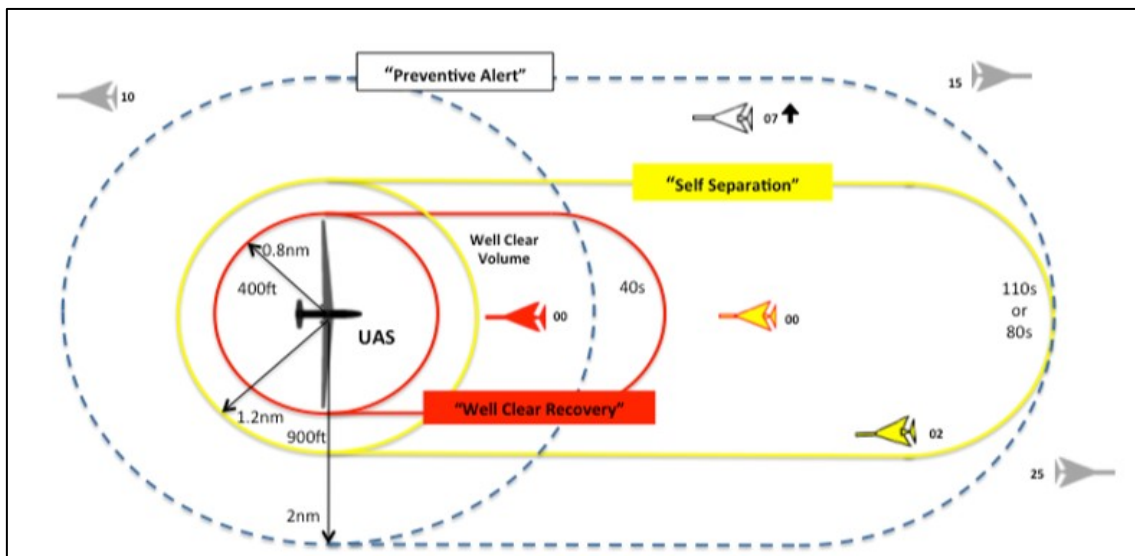
A regulamentação permitirá aos operadores efetuar as suas operações em 3 categorias, a categoria aberta ao qual não é necessária a aprovação da autoridade competente, a específica que irá requerer a autorização da autoridade competente e a categoria certificada, esta última que carecerá da certificação completa da sua operação, incluído a aeronavegabilidade das construções. As categorias foram constituídas de

acordo com o nível de risco onde irão operar, nomeadamente quanto ao risco intrínseco no ar, estando este último dependente da classificação que assenta sobre a premissa das exigências que advém da complexidade do fluxo de tráfego local e no espaço aéreo adjacente (JARUS, 2019). É expectável que na fase U3 ocorram operações de categoria específica e/ou certificada em espaço aéreo controlado, na vizinhança ou em proximidade aos segmentos de aproximação às pistas, desde que a aeronave utilizada na operação esteja devidamente certificada (UE 2019/945). Nesta fase é crucial que as construções usadas, especificamente aquelas em voo automático ou além da linha de vista, face ao risco da operação no local, possuam sistemas tecnológicos para detetar e evitar o tráfego aéreo tripulado, portanto estando dependente a segurança das operações da conciliação das características/capacidades do equipamento (JARUS, 2015).

3.3 – A importância dos sistemas DAA e do UTM nas operações de risco elevado para garantir o RWCL e evitar o LoWCL

Cumulativamente aos sistemas e componentes DAA os serviços UTM, especialmente o serviço ‘Conflict Advisory and Alert Services’(Jarret & Johnson, 2016), se implementados, podem em tempo real conjuntamente com os sistemas DAA embutidos (EUROCAE, 2019a), providenciar os devidos serviços de separação. Os serviços UTM ou serviços no espaço aéreo não controlado, são um conjunto de serviços a serem prestados por um prestador de serviços aos operadores de UAS, com o objetivo de reduzir o risco no ar, no qual se inclui a separação segura das aeronaves tripuladas a operar no mesmo espaço aéreo (SESAR, 2017). Atualmente os sistemas DAA e os processos de mitigação de risco associados às operações, essenciais à segurança durante a integração contínua, estão ainda numa fase de desenvolvimento por diversas organizações, agências ou empresas.

Figura 16 – Exemplo de um modelo de deteção e evasão (DAA) aplicável a aeronaves não tripuladas que não de pequenas dimensões



Fonte: Santiago et al., 2015

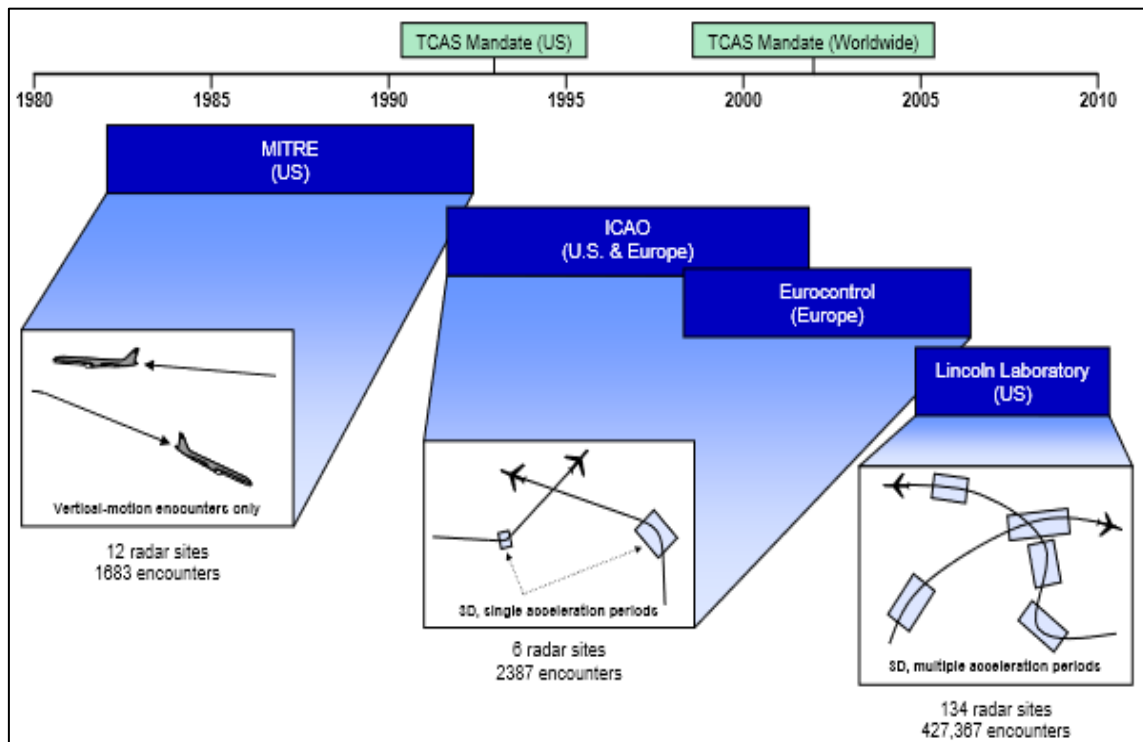
O sistema DAA das aeronaves não tripuladas, irá num futuro próximo, ter capacidade de cooperar com outros sistemas²⁷, nomeadamente com aqueles existentes nas aeronaves tripuladas, tanto no espaço aéreo controlado como no não controlado. Este sistema será especialmente útil em locais onde as aeronaves do tráfego aéreo geral estão isentas de determinados equipamentos interoperáveis e onde é expetável que não seja estabelecido espaço aéreo não tripulado.

Apesar de neste momento não existir bibliografia que faça uma correlação clara dos tipos de operação ao qual o DAA é obrigatório, o mesmo parece ter potencialidade nas operações em espaço aéreo atípico abaixo dos 500', especialmente se em espaço aéreo controlado e no espaço aéreo não controlado até ao seu teto máximo. Na porção de espaço aéreo controlado dos 500' AGL até ao teto máximo de operações comerciais tripuladas, as operações de UAS podem se realizar de forma totalmente integrada, desde que seja garantido um mecanismo 'feedback-loop' (ICAO, 2015)²⁸ e a construção possua equipamentos interoperáveis, como por exemplo sistemas ACAS/TCAS, sistemas estes indispensáveis para a segurança das operações aéreas na aviação civil de transporte de passageiros.

²⁷ Estes sistemas são aqueles atualmente operados pelos prestadores de serviços de navegação aérea e os equipamentos/componentes da aeronave tripuladas, nomeadamente o ADS-B, Transponders Modo A, C e S, e o ACAS/TCAS.

²⁸ 'Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS)'.

Figura 17 – Desenvolvimento dos modelos de encontros entre aeronaves tripuladas baseados no TCAS



Fonte: Kochenderfer et al., 2009

As aeronaves tripuladas usam um método ‘See-And-avoid’, suportado num componente ‘Detect And Avoid’ (EUROCAE, 2019a) para evitarem conflitos em espaço aéreo não controlado. Em espaço aéreo controlado são assegurados os serviços de separação de acordo com a classificação de espaço aéreo (UE 923/2012, SERA.8005), nomeadamente através da aplicação de uma separação vertical e horizontal dependendo do serviço de tráfego aéreo que está a ser prestado. Garante-se por este método a separação das aeronaves tripuladas por gestão do conflito (ICAO, 2005, p.25). através do mecanismo de troca de instruções existente entre os controladores de tráfego aéreo e os pilotos. A redundância a este sistema são os alertas TA (aproximadamente 45s antes do impacto) e as instruções aquando do RA (aproximadamente 30s antes do impacto), ao qual os pilotos devem automaticamente adotar de forma a entrarem novamente em RWCL.

Existem diversos estudos relativos a este assunto, estudando a lógica de funcionamento destes sistemas DAA para os casos em que ocorrem operações totalmente

integradas (Muñoz et al, 2015)(Narkawicz, 2017), no qual são estudados a reação dos sistemas ACAS/TCAS disponíveis nas aeronaves, e acima das altitudes mínimas de voo definidas no SERA ‘Standardized European Rules of the Air’ (UE 923/2012).

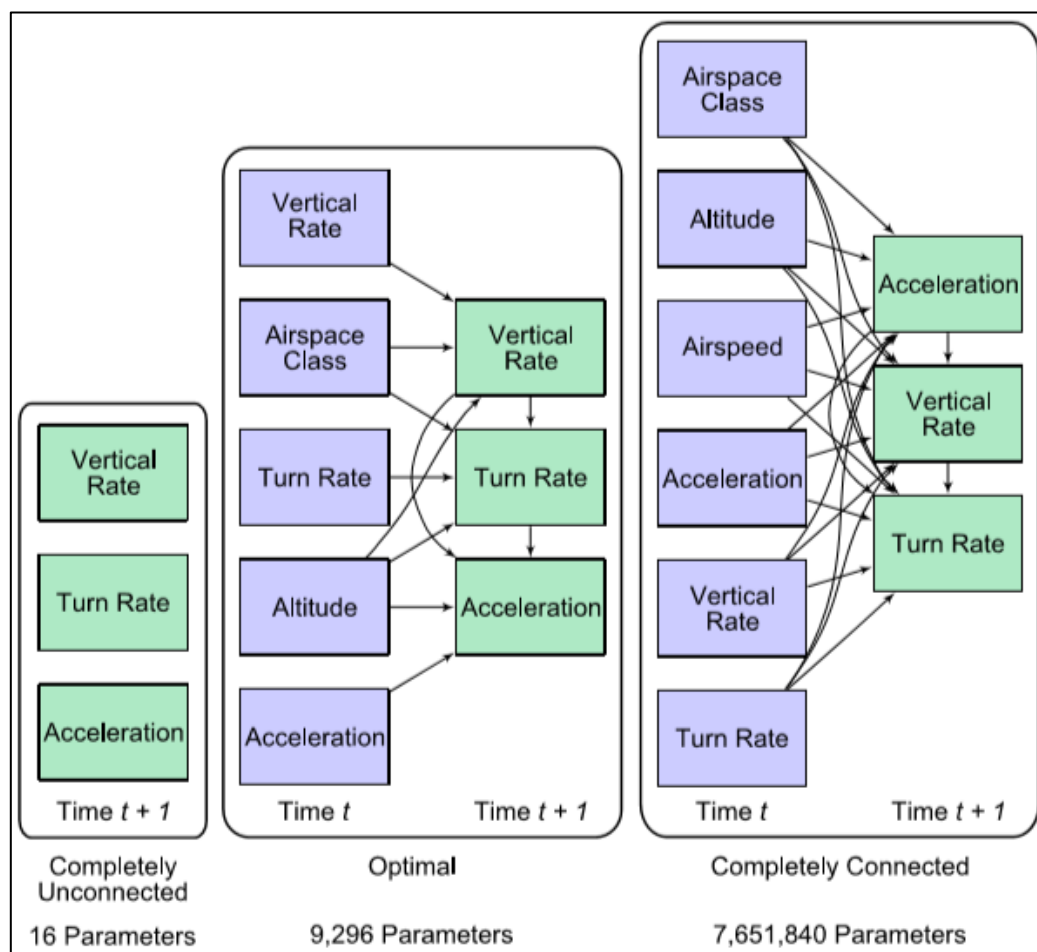
O sistema DAA para operações abaixo das altitudes definidas no SERA (UE 923/2012), terá de ser abordado de forma diferente, pois as aeronaves não tripuladas abaixo dessas altitudes, por representar em riscos acrescidos no ar e no solo, poderão estar limitadas em velocidade e em dimensão (UE 2019/945, parte 1.^a). A limitação de velocidade, torna inviável o uso de sistemas ACAS/TCAS em aeronaves não tripuladas com dimensões abaixo dos 3m que operem a velocidades reduzidas, pois o tempo de voo necessário para reagir a um conflito não permitirá que essas se distanciem num curto espaço de tempo de uma aeronave tripulada que opera em aproximação a velocidades francamente superiores (ICAO, 2006b, p. 77).

Torna-se assim expectável que o sistema DAA para operações de risco elevado a baixa altitude, seja construído com um desenho diferente ou que esteja munido de outras funcionalidades adicionais apropriadas, podendo mesmo ser uma solução baseada exclusivamente no software. O uso de sistemas de automáticos que permitem antecipar o conflito baseado nos dados históricos e táticos, resultando na adoção de um perfil ortogonal de afastamento à aeronave tripulada, de forma a definir e manter a RWCL, contribuirá positivamente para manter os níveis de segurança, sem a necessidade de embutir tecnologia adicional, ou caso seja necessário embuti-la a mesma poderá ser de pequena dimensão..

Este sistema atuará, portanto, como um precursor mitigador que impedirá qualquer situação LoWCL caso esteja definida uma WCL. Apesar do grupo de trabalho WG105-SG10 da EUROCAE estar a desenvolver documentação relativa às especificações técnicas dos sistemas DAA (EUROCAE, 2019a), não existem ainda padrões relativos às especificações técnicas dos componentes, nem quanto ao método de aquisição de informação a ser processada de forma a produzir um ‘output’ que consubstancie numa ação automática de detetar e evitar o tráfego tripulado. Apesar da existência de bibliografia a abordar os sistemas DAA e a RWCL no âmbito das operações de aeronaves não tripuladas, os mesmos baseiam-se em sistemas complexos que carecem da receção de um conjunto significativo de dados. O nível de iteração de fontes de

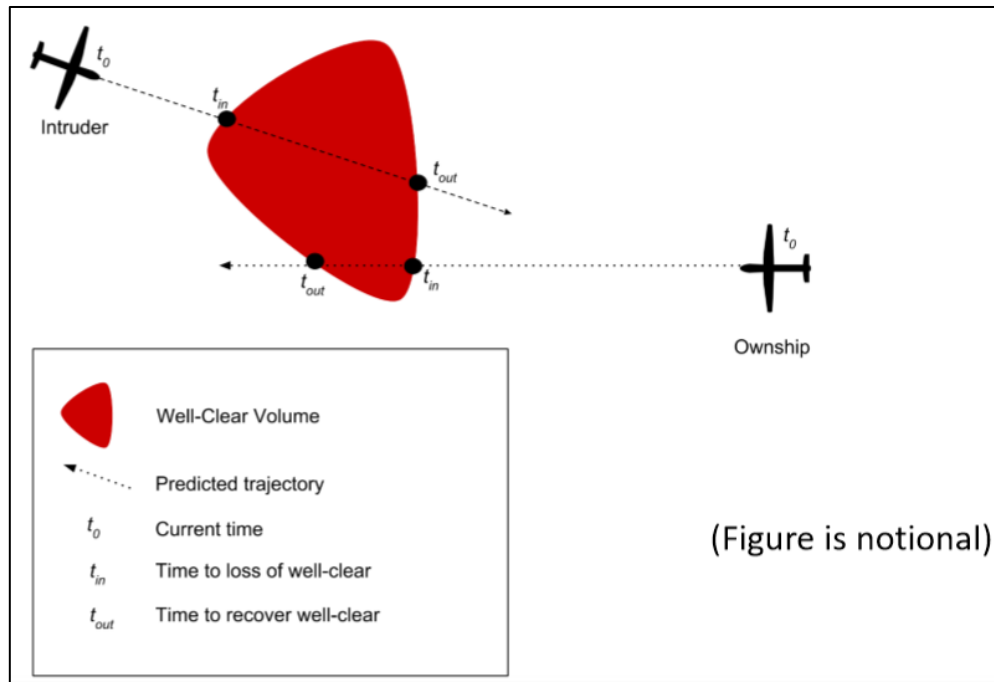
informação nos modelos de encontros podem atingir graus de complexidade muito elevados devido à quantidade de dados introduzidos necessários para estimar o volume de conflito. Os parâmetros de conectividade total podem atingir 7,651,840 milhões (Kochenderfer et al., 2009). Nesta gama de parâmetros, o cálculo em conectividade total necessário está limitado à capacidade dos processadores e à dimensão e autonomia das aeronaves não tripuladas. Além desses cálculos para garantir a WCL, tem sempre de ser garantida a navegação bem como o fluxo de informação cruzada entre todo o sistema funcional na rede, aumentando assim a complexidade das operações devido à interdependência dos equipamentos de voo e das consolas remotas.

Figura 18 – Técnicas de inferência bayesiana para gerar ponderações relacionadas com a probabilidade dos dados observados serem gerados por uma rede em particular



Fonte: Kochenderfer et al., 2009

Figura 19 – Volume WCL, tempo para LoWCL e tempo para RWCL²⁹



Fonte: Balanchandran et al., 2015, p. 9

As técnicas para desenvolver modelos AEC completamente conectados em tempo real de forma a fixar uma RWCL do equipamento DAA, resultam na necessidade de desenvolver técnicas Bayesianas de ligação dos processos para manter a categoria de encontros a um nível baixo (Kochenderfer et al., 2009), pelo que o processamento massivo de dados e saturação dos sistemas de processamento provocará impatos no fornecimento de energia e na autonomia (Hassanalian, 2017) de aeronaves não tripuladas de pequena dimensão.

Os sistemas DAA são um equipamento fundamental para assegurar a integração dos UAS no espaço aéreo pelo que faz sentido desenvolver métodos simples integrados no software, que permitiram com um conjunto reduzidos de dados a automatização do voo, de forma assegurar uma RWCL reduzida no segmento final das pistas, poupando recursos do sistema e ao mesmo tempo mantendo um nível de segurança elevado. O objetivo final dos sistemas são, adaptado ao nível de risco, potenciar o desenvolvimento

²⁹ O autor do estudo usou o termo recuperação 'recover', como método aplicado para a aeronave permanecer ('Remain') livre de conflitos (RWCL) em uma situação de quebra de separação LoWCL.

comercial das atividades específicas ou certificadas na vizinhança das infraestruturas aeroportuárias ou próximo de volumes de espaço aéreo outrora inacessíveis onde a categoria de risco no ar é elevada (JARUS, 2019, p. 3)³⁰.

Apesar de já existirem modelos conceptuais relativos às características dos sistemas DAA, tal como exposto anteriormente, estes debruçam-se sobretudo nas operações integradas no espaço aéreo superior (Radio Technical Commission for Aeronautics [RTCA], 2017, p.19).

Extraiu-se da literatura (Balanchandran et al., 2015) o ponto de quebra de separação entre aeronaves. Esta ocorre sempre que se verifique as seguintes três condições:

1. Sempre que a separação vertical entre as aeronaves seja inferior ao limite estabelecido de 450' (RA, vertical),
2. A distância horizontal no ponto de aproximação mais próximo entre as aeronaves nas suas trajetórias for inferior a 4000' (TA, horizontal),
3. O tempo restante para a colisão das aeronaves em voo for inferior a 30s para uma distância horizontal modificável devido ao movimento de 4000' (RA, horizontal).

³⁰ Relativo ao capítulo 5.3. do Anexo D do SORA 'Specific Operations Risk Assessment'.

Tabela 3 – Sensibilidade da reação de um sistema TCASII a diferentes altitudes de voo

Manned Aircraft Altitude (ft)	SL	Tau (sec)	DMOD (nmi)	ZTHR (ft)	ALIM (ft)
< 1000 (AGL)	2	N/A	N/A	N/A	N/A
1000-2350 (AGL)	3	15	0.20	600	300
2350-5000	4	20	0.35	600	300
5000-10000	5	25	0.55	600	350
10000-20000	6	30	0.80	600	400
20000-42000	7	35	1.10	700	600
> 42000	7	35	1.10	800	700

Fonte: Thipphavong et al., 2017

Este ponto de quebra de separação é coerente com a súmula das definições de WCL aplicáveis a UAS de pequenas dimensões (Lester, 2019), de acordo com a classificação de espaço aéreo onde estão operar.

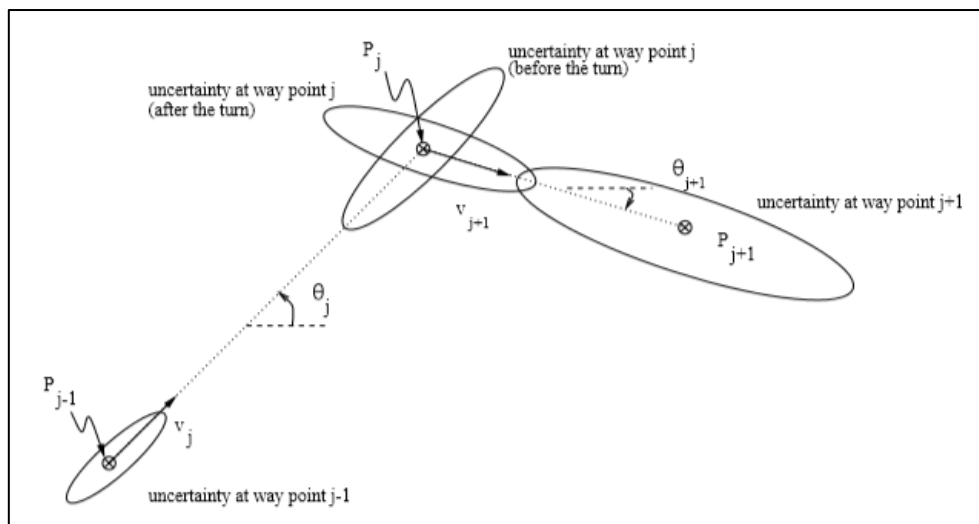
A bibliografia define de forma muito similar este método. No entanto, nos estudos efetuados até ao momento são desconsideradas as operações abaixo dos 1000' AGL, pelo que não existe informação que permita aferir a sensibilidade destes sistemas DAA a baixo dessa altitude, caso seja usado um método semelhantes aos sistemas TCAS/ACAS (Thipphavong et. al., 2017), atualmente com uma forte presença no mercado. Adicionalmente os estudos que foram possível obter relativos à probabilidade de encontros e risco de colisão em volta de aeroportos, normalmente consideram operações de UAS a altitudes muito elevadas e a velocidades superiores a 40k nós (Lee et al., 2013), ou seja, a aplicabilidade restringe-se a aeronaves não tripuladas a efetuar operações ICAO IFR de tipo I (ICAO, 2017, p.14).

Reconhece-se no entanto a sua potencialidade para voos acima dos 1000' AGL, no qual são operadas aeronaves de grandes dimensões na categoria certificada, especialmente se essa atividade ocorrer em espaço aéreo controlado. Quanto às aeronaves não tripuladas de pequenas dimensões, os sistemas DAA propostos podem ser baseados em sistema radar embutidos (McClellan, 2017) desenvolvidos numa perspetiva de

‘Sense-And-Avoid’, portanto mimica o método de separação ‘See-And-Avoid’, ou seja ver e ser visto, aplicável à aviação tripulada. Esta solução não é ótima pois requiere que o UAS seja equipado com componentes adicionais diminuindo a sua capacidade de carga útil e autonomia tal como anteriormente exposto. O racional de aumentar as separações entre aeronaves não tripuladas e não tripuladas, aplicando as mesmas regras já existentes na aviação moderna, caso integradas no espaço aéreo tripulado, será relativamente fácil de atingir a alturas de voo mais elevadas, pois toda a tecnologia está desenvolvida, bastando portanto melhorar e adaptar esses sistemas.

No entanto, as grande dificuldade prende-se com os UAS de pequenas dimensões, pois as separações, para garantir a eficiência e o proveito económico, terão de ser de algumas centenas de metros invés de quilómetros ou milhas, pelo que face às limitações conhecidas destes sistemas, as soluções mais apropriadas são aquelas mais viradas para o software, que garantam a possibilidade de integração em uma rede digital.

Figura 20 – Modelo de previsibilidade de alcance médio aplicável a aeronaves tripuladas



Fonte: Prandini et. al., 2019

Nota: O conflito dependerá da trajetória ser coincidente com a área de incerteza circular em torno de um determinado ponto durante o movimento

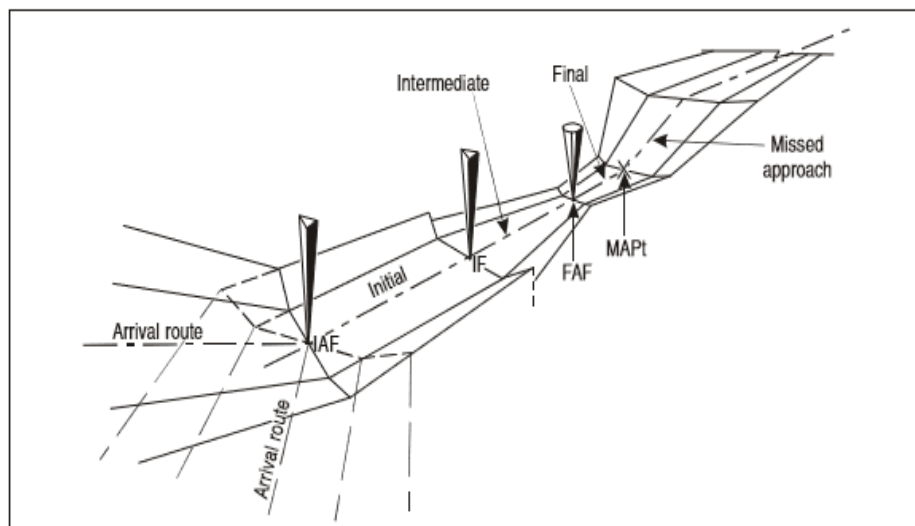
As soluções deixaram de passar a responsabilidade para o operador remoto e usar o sistemas já existentes, para efetivamente desenvolver novos sistemas. A

informação a utilizar por estes sistemas está dependente e terá de forçosamente provir da informação interoperável partilhada desde o originador, por exemplo por outras aeronaves (Perez-Battle, 2013), ou qualquer outra fonte³¹. Atendendo às considerações expostas, os sistemas DAA aplicáveis a UAS de pequena dimensão, não exclusivamente, podem ser desenvolvidos de forma a apresentar diferentes soluções para o mesmo problema nomeadamente através de software, ou seja, com o objetivo de impedir perdas de separação LoWCL que levem a incidentes ou acidentes com aeronaves tripuladas.

3.4 – Caraterização do segmento final da aproximação ILS à pista 03

A pista 03 ao aeroporto Humberto Delgado é servida por uma aproximação de precisão, especificamente por uma aproximação ILS CAT I (eAIP, 2019). Esta é a pista normalmente em uso devido à sua orientação voltada a norte (ICAO, 2007, p. 130), direção predominante do vento com maior intensidade em Portugal Continental. As aproximações para uma pista podem conter 5 segmentos de aproximação.

Figura 21 – Segmentos de uma aproximação por instrumentos

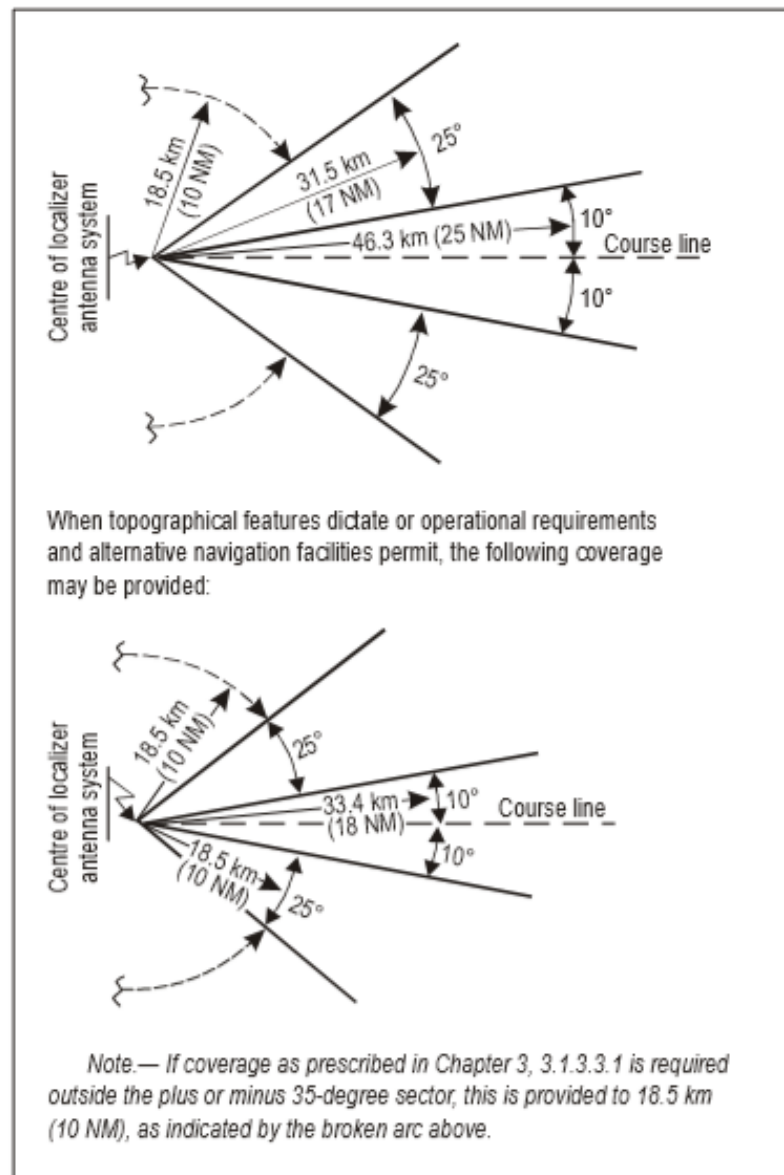


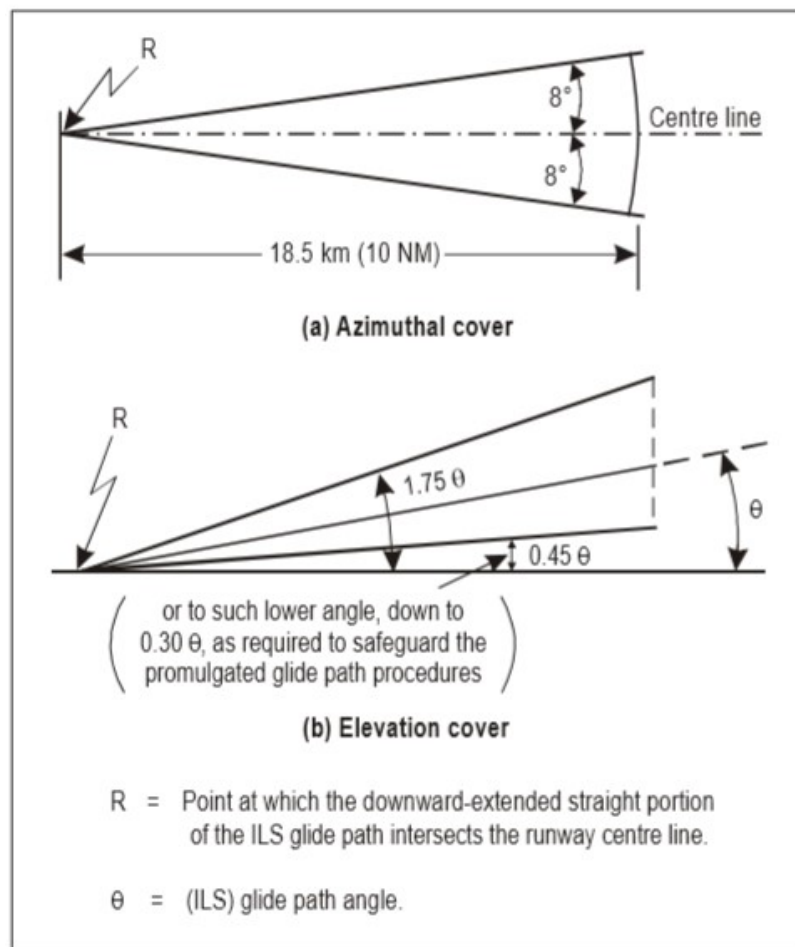
Fonte: ICAO Doc. 8165 Volume 1, *Flight Procedures*.

³¹ O esboço do U-space indica que a informação fluirá das aeronaves tripuladas e dos prestadores de serviços à navegação aérea tripulada, diretamente para uma plataforma do prestador de serviços a tráfego não tripulado, que por sua vez disponibilizar essa informação aos operadores de UAS.

O segmento final que inclui o FAF, o MAPt e o TDZ são aqueles relevantes para as operações UAS no U-space abaixo dos 500' AGL. A descida neste tipo de instrumentos é efetuada a um nível ótimo com um gradiente de descida de 5.2% ou 3° radianos. A tolerância máxima e mínima é de 3,5° e 2,5° graus respetivamente, limites estes aplicáveis a qualquer ILS de categoria I. A intersecção na ladeira é efetuada antes do FAF entre os 3000' e os 1000' acima da elevação da pista, normalmente a uma distância de 6 km (3NM) ou 19 km (10NM) e a uma razão de descida constante que dependerá da performance e da categoria de velocidade da aeronave na final de precisão (ICAO, 2006b, p.73).

Figura 22 – Cobertura azimutal de um LLZ 'localizer' e da antena da elevação GP Glide Path)



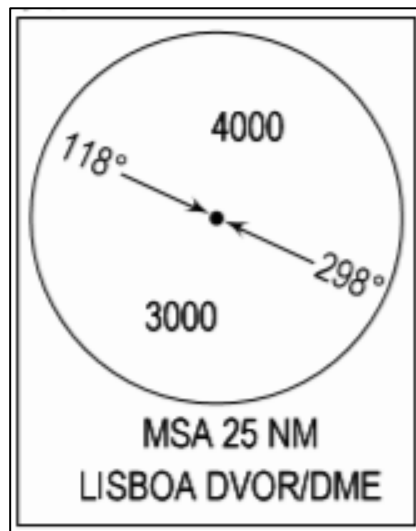


Fonte: ICAO Anexo 10 Volume I, Radio Navigation Aids.

O cone tridimensional de aproximação ILS é formado pela cobertura azimuthal lateral ($\pm 10^\circ$) do 'Localizer' (LLZ) para cada um dos lados do prolongamento da linha central de pista (ICAO, 2006a, p. 344) sendo que, este último, intersecta-se com o valor ótimo da ladeira (3°) com um lóbulo de emissão cobrindo entre $1,75^\circ$ e $5,25^\circ$, cujo os valores máximos ($3,5^\circ$) e mínimos ($2,5^\circ$) do gradiente de descida (GP) permitidos para a pista 03, possibilitam projetar uma elipse bidimensional onde as aeronaves obrigatoriamente terão de cruzar para garantir a aterragem na pista. Qualquer desvio a este cone torna a aproximação impraticável por motivos de performance, no qual o resultado de não se iniciar a manobra de descontinuação da aproximação na DA/MAPt, resultará em excursão da pista. As aeronaves que são vetorizadas, a efetuar um voo por

instrumentos para a final ILS têm de cumprir com a MVA³² ou com a MSA³³, portanto apenas podem descer abaixo dessas altitudes assim que iniciarem o procedimento.

Figura 23 – MSA ILS RWY 03 CAT II/III LPPT



Fonte: AIP Portugal

Figura 24 – Projeção da final ILS da RWY03 do Aeroporto Humberto Delgado elaborada a partir da carta de aproximação da carta de aproximação LPPT AD 2.24.12 – 1, e de acordo com as orientações da ICAO Doc. 8168, Vol. I, 2006.

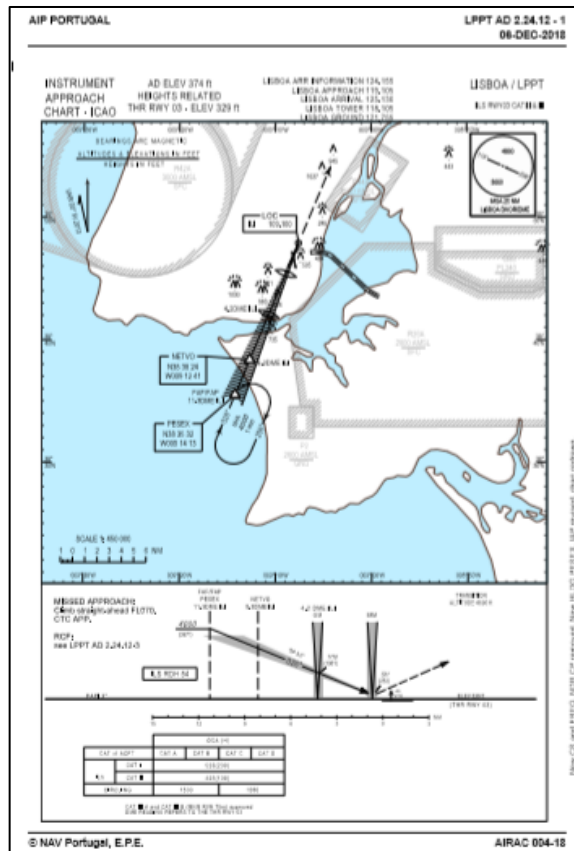


Fonte: Elaborado pelo mestrando

³² MVA ('minimum vectoring altitude') é a altitude mínima a que uma aeronave pode ser vetorizada.

³³ MSA ('minimum sector altitude') é a altitude mínima do sector para a aproximação, sendo que a altitude mínima de voo permitida para a zona de controlo estudada é 3000' ou 900m.

Figura 25- Carta da aproximação ILS RWY 03 CAT II/III LPPT



Fonte: eAIP, 2019³⁴

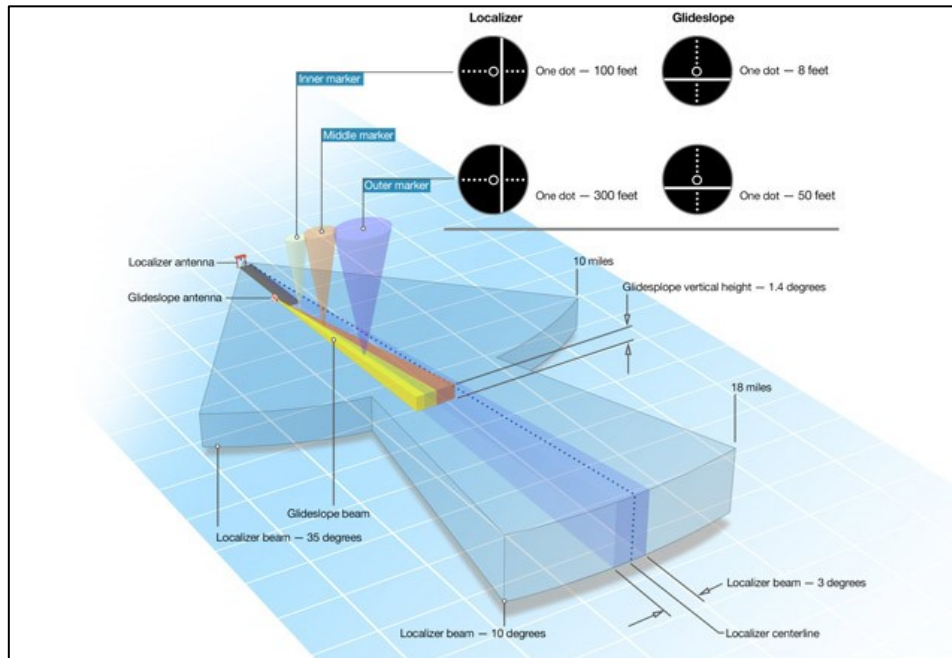
3.5 – Trajetórias reais de aeronaves tripuladas nas aproximações a pistas

As aeronaves tripuladas que estão a executar uma aproximação de precisão, apenas continuam a execução da descida abaixo da altitude mínima permitida, desde que se mantenham nos limites máximos azimutais e de elevação (ICAO, 2006a, p. 344) (ICAO, 2006b), caso estejam a efetuar manobras de aterragem. As aproximações apenas continuam até à pista desde que esta seja realizada entre os limites permitidos³⁵.

³⁴ A carta de aproximação ser obtida no AIP de Portugal, disponibilizado eletronicamente pela NAV Portugal E.P.E. na parte LPPT AD 2.24.12 – 1.

³⁵ As aeronaves efetuam as aproximações desde que mantenham a sua aproximação dentro dos parâmetros (dot) azimutais e de ladeira.

Figura 26 – Representação de uma final de aproximação por instrumentos com a respetiva informação dos “dot” e o desvio azimutal e de ladeira associado de acordo com as orientações da ICAO Doc. 8168, Vol. I, 2006.



Fonte: aviation.stackexchange.com

As aeronaves tripuladas a operar na pista 03 do Aeroporto Humberto Delgado possuem requisitos técnicos que permitem o acesso ao espaço aéreo controlado com grande fluxo de tráfego. A operação só é possível por este tipo de aeronaves, em grande parte devido à tecnologia obrigatória que estas possuem, destacando-se além das comunicações bilaterais, o Transponder Modo S, o ADS-B e o ILS, bem como as capacidades do sistema de navegação aérea para recolher toda a informação das trajetórias de forma a executar os procedimentos que garantam o fluxo ordenado, expedito e em segurança do tráfego aéreo. Os dados das trajetórias reais das aeronaves são importantes para a os estudos de capacidade e reorganização do espaço aéreo no Céu Único Europeu, pelo que toda a informação é armazenada num repositório gerido pelo EUROCONTROL em tempo real (EUROCONTROL DDR, 2019). Os dados estão disponíveis e podem ser usados para efetuar estudos ‘ad-hoc’ da mais variada índole, como apropriado (EUROCONTROL NEST, 2019). Os dados em questão são também armazenados pelos prestadores de navegação aérea locais. Estes dados tendem a ser mais exatos, pois são obtidos diretamente das estações em terra que monitorizam as aeronaves através das

portas de comunicação dos componentes a bordo, nomeadamente os transponders e o ADS-B. As taxas de atualização são normalmente abaixo dos 5s de forma a garantir o dado da posição com grande precisão, requisito essencial considerando que estas aeronaves se deslocam a velocidades elevadas.

Além das aproximações por instrumentos, as aeronaves tripuladas também efetuam operações visuais às pistas. Uma aproximação visual pode ser efetuada por uma aeronave tripulada que voe em condições visuais³⁶, portanto navegando com base a referências visuais no solo desde que as condições meteorológicas³⁷ permitem esse voo de acordo com os requisitos. No entanto, estas aeronaves têm sempre de cumprir com as altitudes mínimas de voo para o voo visual³⁸ (EU 923/2012, SERA.5005), nomeadamente manter 1000' (300m) acima da superfície do solo sobre cidades e 500' (150m) em qualquer outra zona, exceto para efetuar manobras de aterragem e descolagem. Adicionalmente, devem cumprir com as cartas aeronáuticas relativas às aproximações visuais e às rotas publicadas para o espaço aéreo em questão^{39, 40}, de acordo com as regras do seu plano de voo⁴¹.

³⁶ Um voo visual (VFR) é aquele que é efetuado com referência a pontos geográficos na superfície do solo tal como definido no número 134 do artigo 3.º do Regulamento (UE) 923/2012.

³⁷ Os voos VFR têm de ser efetuados em condições meteorológicas visuais (VMC), tal como definido no SERA.5001 do Regulamento (UE) 923/2012.

³⁸ As altitudes mínimas de voo para voos VFR são aquelas que constam na alínea f) SERA.5005 do Regulamento (UE) 923/2012)

³⁹ A carta aeronáutica da aproximação visual LPPT AD 2.24.13 – 3, está disponível no AIP Portugal, disponibilizado eletronicamente pela NAV Portugal E.P.E.

⁴⁰ A carta aeronáutica relativa às rotas visuais para helicópteros na zona de controlo de Lisboa LPPT AD 2.24.13 – 3 e de entrada e saída da intersecção a RWY03/RWY35 Lisboa LPPT 14-15, está disponível no AIP Portugal e no Manual VFR, respetivamente, disponibilizadas eletronicamente pela NAV Portugal E.P.E.

⁴¹ Essas regras de voo podem ser as regras de voo visuais (VFR) ou por instrumentos (IFR) tal como definido no SERA.

SINTRA
VORTAC 112.100
SRA CH 58X
N38 49 45 W009 20 25
500

CASCAIS
DVOR/DME 114.300
CAS CH 90X
N38 44 54 W009 21 43
700

LISBOA
DVOR/DME 114.800
LIS CH 95X
N38 53 16 W009 09 46
1100

R42B FL245 1000 AGU/AMSL SFC

R42A 3000 AMSL SFC

R44A 1500 AMSL SFC

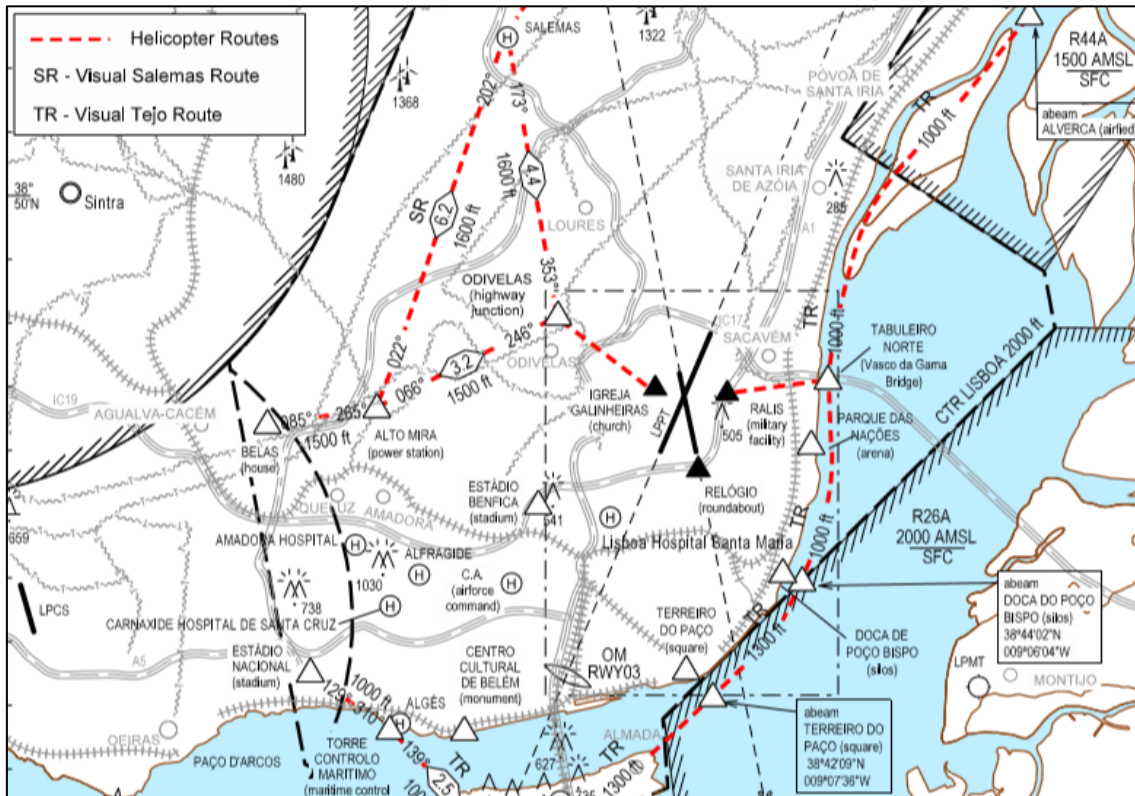
R26A 2000 AMSL SFC

North river bank N38 42 11 W009 15 41

VOR 03 IN 2013

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias – Escola das Ciências Económicas e das Organizações 51

Figura 28 – Recorte das rotas visuais para helicópteros na zona de controlo de Lisboa (esquerda) e a entrada e saída a partir da intersecção da RWY03/35. O helicópteros operam entre 1000'e 1500'dependendo da porção da rota que está a ser voada.



Fonte: eAIP

3.6 – Caraterização do bloco de Espaço Aéreo

A zona de Controlo de Lisboa (Electronic Aeronautical Information Publication [eAIP], 2019) está classificada como espaço aéreo C⁴² face à complexidade e volume das operações aéreas que aí se desenrolam. Neste espaço aéreo são permitidos voos IFR e VFR. É prestado o serviço de controlo de tráfego aéreo e os voos IFR são separados dos voos IFR e dos voos VFR. Os voos VFR são separados dos voos IFR e recebem informação de tráfego de outros voos VFR e a pedido, é prestado o serviço de separação. Neste espaço aéreo é necessário manter uma comunicação bilateral contínua com todos os voos. Os voos VFR estão limitados a uma velocidade de 250kts de velocidade do ar verdadeira sempre que voam abaixo dos 10.000'(3050m) acima da superfície do nível

⁴² A classificação de espaço aéreo está publicada no AIP Portugal, LPPT AD 2.17.

médio das águas do mar, exceto se aprovado pela autoridade competente para o tipo de aeronave, que por razões técnicas ou de segurança. não possa manter essa velocidade. Todos os voos estão sujeitos a autorização de controlo de tráfego aéreo (UE 923/2012 ,SERA.6001).

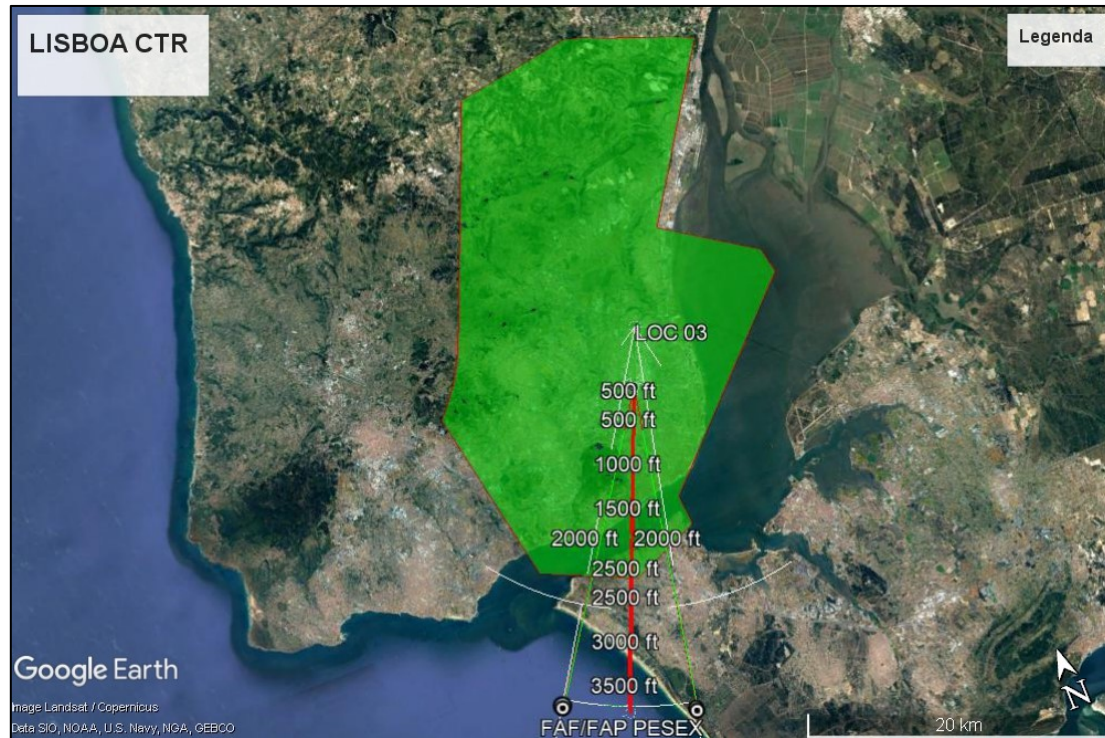
Tabela 4 – Caracterização do espaço aéreo da zona de controlo de Lisboa

Designação	LISBOA CTR
Limites laterais	385738N 0091104W – 385817N 0090538W – 385640N 0090009W - 385055N 0090459W – 384849N 0090056W – 384755N 0090043W - 384148N 0090835W – 384043N 0090829W – 383938N 0091141W - 384105N 0091545W – 384724N 0091717W, depois no sentido contrário aos ponteiros do relógio um arco de 7.5NM centrado em 385240N 0092407W – 384940N 0091519W – 385738N 0091104W, Excluindo as porções coincidentes com a CTR de Cascais e a LP-R43C quando ativada.
Limites verticais	2000' de altura (600M)
Classificação de espaço aéreo	C
Nível de transição	4000'
Volume (km ²) ⁴³	487,7

Fonte: Elaborada pelo próprio a partir do eAIP

⁴³ O volume foi estimado a partir da projeção das coordenadas num ficheiro .kmz do GoogleEarth.

Figura 29- Projeção das coordenadas da zona de controlo de Lisboa num polígono (verde) no Google Earth



Fonte: Elaborada pelo próprio a partir do eAIP

3.7 – Caraterização do bloco de Espaço Aéreo

A Autoridade Aeronáutica da Aviação Civil publicou a 14 de dezembro de 2016 o Regulamento n.º 1093/2016 com o objetivo de regular o acesso ao espaço aéreo pelos operadores de aeronaves não tripuladas. Com o objetivo de salvaguardar as operações das aeronaves tripuladas a decorrer no espaço aéreo, nomeadamente aquelas a operar em espaço aéreo controlado⁴⁴ afeto aos aeroportos internacionais, foram criadas áreas de acesso proibido ou de restrição operacional, tal como consta no Anexo do normativo legal referido. As áreas em questão são estáticas e tentam proteger, através da área proibida, as aeronaves tripuladas a efetuar aproximações às pistas, enquanto que as áreas de proteção

⁴⁴ No número 1 do art.º 5.º do Regulamento da ANAC n.º1093/2016, de 14 de dezembro, as operações de aeronaves não tripuladas na proximidade de aeródromos com CTR associada devem respeitar as regras e restrições constantes do Anexo ao Regulamento.

da área 1, 2 e 3 restringem os voos UAS a partir de uma determinada altura de forma a salvaguardar o tráfego que evolua fora do alinhamento da final, nomeadamente a efetuar aproximações visuais nos circuitos de tráfego ou a navegar nas rotas de helicópteros. Estas áreas tridimensionais funcionam para todos os efeitos como uma WCL, definindo assim a separação horizontal (i.e. 1km da linha central da pista 03 do Aeroporto Humberto Delgado) e vertical mínima exigida. As restrições aplicáveis na zona de controlo de Lisboa são (Regulamento 1093/2016, Anexo I):

- **Área Proibida (Vermelho):**

Polígono definido pelas seguintes coordenadas: 38°51'42.99"N 009°06'18.88"W - 38°48'41.29"N 009°07'56.23"W - 38°49'55.86"N 009°08'16.28"W - 38°49'42.49"N 009°09'37.46"W - 38°49'42.49"N 009°09'37.46"W - 38°46'55.90"N 009°08'52.62"W - 38°41'55.95"N 009°11'32.84"W - 38°41'30'.92"N 009°10'16.45"W - 38°45'04.11"N 009°08'22.56"W - 38°43'08.80"N 009°07'51.58"W - 38°43'21.42"N 009°06'34.95"W - ao longo da área restrita LPR26A até 38°43'24.39"N 009°06'31.13"W - 38°46'49.48"N 009°07'26.18"W - 38°51'17.90"N 009°05'02.35"W - até à origem.

No interior da presente área são proibidos os voos de RPA, salvo nas situações mencionadas no n.º 2 do artigo 11.º

- **Área 1 (Laranja):**

Polígono definido pelas seguintes coordenadas, excetuando a área proibida: 38°52'33.13"N 009°08'51.98"W - 38°42'45.98"N 009°14'05.65"W - 38°40'56.07"N 009°08'30.22"W - ao longo da área restrita LPR26A até 38°44'05.27"N 009°05'38.61"W - 38°49'48.32"N 009°02'50.48"W - ao longo da área restrita LPR44A até 38°51'12.08"N 009°04'44.61"W - até à origem.

No interior da presente área são permitidos voos de RPA até 30 metros acima da superfície ou até à altura máxima do obstáculo natural ou artificial existente num raio de 75 metros, centrado na aeronave, caso a altura de tais obstáculos seja superior a 30 metros. A operação acima das alturas mencionadas anteriormente carece de autorização da ANAC.

- **Área 2 (Amarelo):**

Constituída por dois polígonos definidos da seguinte forma:

Polígono 1, definido pelas seguintes coordenadas: 38°53'29.99"N 009°02'48.78"W - 38°56'24.89"N 009°11'43.09"W - 38°49'48.02"N 009°15'14.87"W - ao longo da área restrita LPR42A até 38°47'24.81"N 009°17'16.52"W - ao longo da CTR de Cascais até - 38°41'04.82"N 009°15'44.77"W - 38°39'37.93"N 009°11'41"W - 38°40'42.93"N 009°08'29"W - ao longo da área restrita LPR26A até 38°40'56.07"N 009°08'30.22"W - 38°42'45.98"N 009°14'05.65"W - 38°52'33.13"N 009°08'51.98"W - 38°51'12.08"N 009°04'44.61"W - ao longo da área restrita LPR44A até à origem;

Polígono 2, definido pelas seguintes coordenadas: 38°49'48.32"N 009°02'50.48"W - ao longo da área restrita LPR44A até 38°48'49"N 009°00'56"W - 38°47'55"N 009°00'43"W - ao longo da área restrita LPR26A até 38°44'05.27"N 009°05'38.61"W - até à origem;

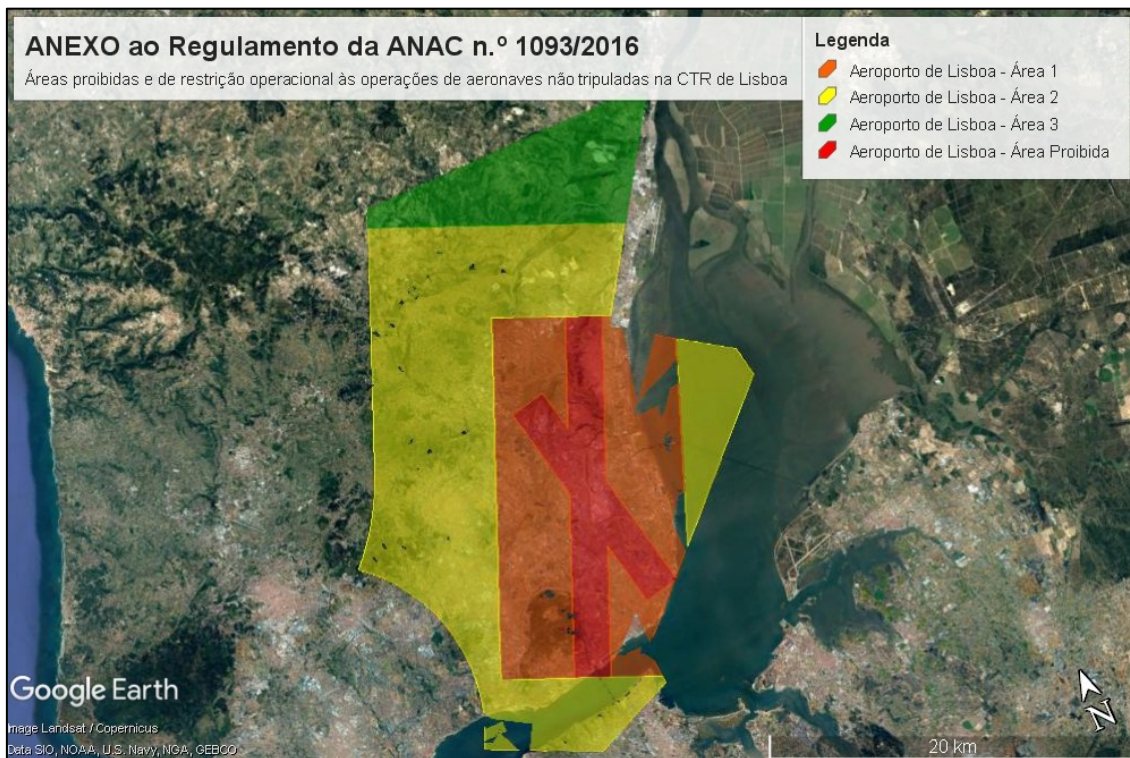
No interior da presente área são permitidos voos de RPA até 60 metros acima da superfície ou até à altura máxima do obstáculo natural ou artificial existente num raio de 75 metros, centrado na aeronave, caso a altura de tais obstáculos seja superior a 60 metros. A operação acima das alturas mencionadas anteriormente carece de autorização da ANAC.

• **Área 3 (Verde):**

Polígono definido pelas seguintes coordenadas: 38°56'55"N 009°11'27"W - ao longo da área restrita LPR42C até 38°56'55.43"N 009°01'01.84"W - 38°56'40"N 009°00'09"W - ao longo da área restrita LPR44A até 38°53'29.99"N 009°02'48.78"W - 38°56'24.89"N 009°11'43.04"W - até à origem.

No interior da presente área são permitidos voos de RPA até 80 metros acima da superfície ou até à altura máxima do obstáculo natural ou artificial existente num raio de 75 metros, centrado na aeronave, caso a altura de tais obstáculos seja superior a 80 metros. A operação acima das alturas mencionadas anteriormente carece de autorização da ANAC.

Figura 30 - Projeção da área proibida e das áreas de restrição operacional na zona de controlo de Lisboa⁴⁵



Fonte: ANAC, www.voanaboa.pt

⁴⁵ As áreas foram obtidas através do ficheiro .kmz disponível na ANAC através do Portal <https://voanaboa.pt/Files/downloads/Regulamento-RPA-ver-5.0.kmz>, acedido em 16 de agosto de 2019.

CAPÍTULO 4: METODOLOGIA

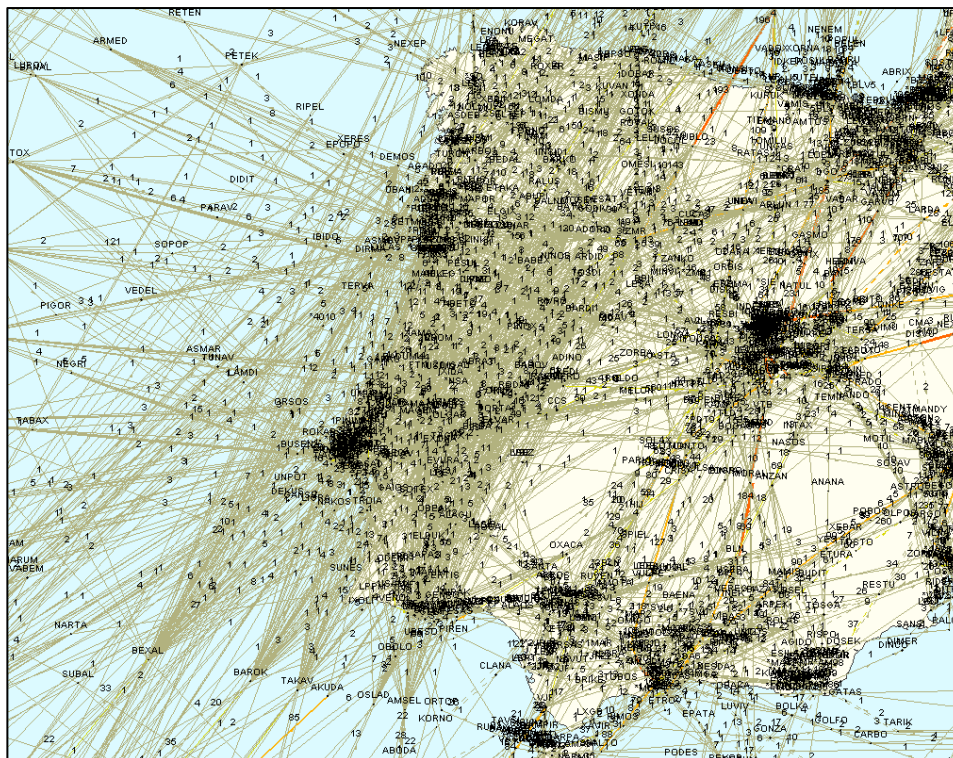
4 – Métodos de separação concetualizados para as aeronaves não tripuladas

4.1 – Enquadramento da metodologia

O presente estudo pretendeu conceber um método simples de averiguar o local exato onde o risco de impacto entre UAS e aeronaves tripuladas é mais elevado, baseado na informação das trajetórias reais históricas das aeronaves tripuladas para a pista 03 ao Aeroporto Humberto Delgado.

Esta informação histórica permite conceber um modelo onde é possível estimar com um elevado grau de confiança o local onde as aeronaves tripuladas cruzam o nível de voo a 1000' (300m) e a 500' (150m) de altura da superfície da pista de aterragem tal como referido na questão de investigação. O conjunto de dados das trajetórias foram analisados para obter um padrão na posição onde ocorre a perfuração das camadas supracitadas.

Figura 31 – Dados das trajetórias referentes aos ciclos AIRAC de 21 de junho de 2018 a 18 de junho de 2018



Fonte: Projeção das trajetórias DDR dos dados no NEST

A concetualização e sistemas que garantam a separação, seja através dos sistemas de comando e controlo atuais ou os sistemas DAA, tendo também em conta o objetivo de diminuir a quantidade de informação a ser trocada, com benefícios óbvios para a autonomia, carece da projeção do padrão específico identificado para o aeroporto, no software, antes do início da operação. A disponibilidade desta informação possibilitará que os UAS mantenham uma distância padrão do local identificado, e eventualmente, no caso de uma integração com o sistema UTM, receber um pacote de informação reduzido relativo à aproximação de uma aeronave tripulada na camada a 1000' (300m) acima da superfície, com o objetivo de aumentar ou reduzir a WCL, adicionando dinamismo através de um processo com dois estados, cuja a alteração é decidida automaticamente através do 'software' após a receção de uma informação que instrua a mudança de estado, levando o UAS a adotar um perfil de voo que assegure que este esteja sempre em RWCL em qualquer um desses estados.

A identificação do padrão de cruzamento da camada a 1000' (300m) e a 500' (150m) das aeronaves em aproximação, permitirá que o UAS mantenha uma distância segura pré-definida para o conceito de operação em questão. Os dados das trajetórias reais, nas camadas de estudo, possibilitaram definir o padrão, podendo o método, ser aplicável a qualquer outra camada ou zona do espaço aéreo, de forma a identificar os locais onde as aeronaves estão efetivamente a voar abaixo das altitudes mínimas de voo, portanto estando expostas aos potenciais perigos de colisão com uma aeronave não tripulada de pequena dimensão característica, a operar na vizinhança a baixa altitude VLL. O método desenvolvido pode comensurar em um indicador específico para o espaço aéreo em questão, podendo-se adicionar outras variáveis como sazonalidade, tipo de tráfego, período, condições meteorológicas entre outros, de acordo com os dados das trajetórias usados para construir o modelo. A metodologia desenvolvida tem como objetivo definir o local onde passam as trajetórias, caracterizá-los e definir os possíveis estados WCL que asseguram o RWCL das operações de UAS face às aeronaves tripuladas a operar na vizinhança. Outro objetivo é comparar as áreas identificadas com as áreas atualmente usadas de forma a verificar se a aplicação do método se traduz em aumento de eficiência da utilização do espaço aéreo.

4.2 – Enquadramento da metodologia

4.2.1 – Metadados

Os dados das trajetórias foram obtidos através do download do AIRAC relativo ao ciclo entre 21 de junho de 2018 e 18 de julho de 2018, disponível no 'Data Demand Repository' (DDR) do EUROCONTROL. Apesar dos dados do repositório terem sido concebidos e compilados apenas para efetuar estudos de capacidade num determinado bloco de espaço aéreo predefinido através de um software especialmente concebido, os dados contêm dados que permitem extrair as coordenadas decimais das trajetórias por cada segmento, ponto de reporte e respetiva altitude.

Os dados correspondem a todos os voos que cruzaram durante pelo menos 1 s de voo a área IFPZ alargada⁴⁶ num determinado dia. O objetivo é permitir que sejam captados todos os movimentos de forma a efetuar cálculos realísticos baseados no número de voos, com o objetivo de refletir os voos atuais nas listas de voos planeados para esse espaço aéreo num determinado dia. Os ficheiros estão no formato .so6 (SegOut6) e são originados através dos perfis do SAAM⁴⁷, da base de dados PRISME ou do DDR. Os ficheiros DDR são obtidos através informação radar pura (CPR data).

⁴⁶ A zona IFPZ alargada é a zona geográfica cujo todos os dados relativos aos voos são recebidas pelo gestor de rede.

⁴⁷ Acrónimo para 'System for traffic Assignment and Analysis at Macroscopic level'.

Figura 32 – Zona IFPZ alargada



Fonte: NEST Manual

As trajetórias das chegadas ao aeroporto Humberto Delgado foram filtradas, projetadas e exportadas usando o ‘software’ NEST 1.8 ‘Modelling Tool’ do EUROCONTROL. O filtro aplicado para obter as projeções referente ao ciclo foi parametrizado para:

- ‘Airac Cycle’ 21Jun2018 até 18jul2018;
- ‘Trajectories’ – Actual;
- ‘Type’ – ‘Arrivals’;
- ‘ICAO Arrival Airport Identification’ – LPPT.

Aos ficheiros .so6 obtidos, extraiu-se os dados relativos às posições #3 (‘destination airport’), #7 (‘FL begin segment’), #8 (‘FL end segment’), #13 (‘lat begin segment’), #14 (‘lon begin segment’), #15 (‘lat end segment’), #16 (‘lon end segment’).

Tabela 5 – Códigos dos blocos de informação contida no ficheiro .so6

#	Field	Type	Size	Comment
1	segment identifier	char		first point name " _ "last point name (see note)
2	origin of flight	char	4	ICAO code
3	destination of	char	4	ICAO code

	flight			
4	aircraft type	char	4	
5	time begin segment	num	6	HHMMSS padded with o's
6	time end segment	num	6	HHMMSS padded with o's
7	FL begin segment	num	1 to 3	
8	FL end segment	num	1 to 3	
9	status	char	1	0=climb, 1=descent, 2=cruise
10	callsign	char		
11	date begin segment	num	6	YYMMDD padded with o's
12	date end segment	num	6	YYMMDD padded with o's
13	lat begin segment	float		in minute decimale
14	lon begin segment	float		in minute decimale
15	lat end segment	float		in minute decimale
16	lon end segment	float		in minute decimale
17	flight identifier	num		same as the one provided in expand file (must be uniq). In case of flight option it is >=1000000000)
18	sequence	num		start at 1 for every new flight, incremented at each lines. IMPORTANT !
19	segment length	float		in nautical miles

Fonte: NEST Manual

4.2.2 – Conversão em dados, organização e cálculos

O ficheiro padrão foi separado e criado um ficheiro referente a cada um dos dias do ciclo, através da aplicação do seguinte procedimento:

- Seleção do dia do ciclo;
- 'Export';
- .txt do Notepad++.

Os dados padrão em formato .txt foram compilados em linhas e colunas num ficheiro .xls do Microsoft Office 2018. O processo permitiu organizar os dados e efetuar uma nova filtragem com os seguintes parâmetros:

- **#3: LPPT** – Trajetórias referentes ao indicador de lugar do aeroporto de chegada;
- **#7: F10** – Posição no perfil ortogonal da trajetória a 1000' (300m) / latitude inicial #13 / longitude inicial #14;
- **#7: F5** – Posição no perfil ortogonal da trajetória a 500' (150m) latitude inicial #13 / longitude inicial #14;
- **#8: F0** – Posição no perfil ortogonal da trajetória a 0' (0m) / latitude inicial #13 / longitude inicial #14.

Tabela 6 – Exemplo de um dado filtrado para um voo de UUEE para LPPT realizado no dia 21 de junho de 2018

#	Descrição	Dado
3	'Destination airport (ICAO)'	LPPT
7	'FL begin segment'	10
8	'FL end segment'	0
13	'Lat begin segment'	2325,033333
14	'Lat end segment'	-548,866667
15	'Lon begin segment'	2326,45
16	'Lon begin segment'	-548,05

Fonte: Elaborado pelo próprio

Os dados trabalhados (coluna #) foram organizados em colunas. Os dados das coordenadas em minutos decimais de latitude (**Lat**) e longitude (**Lon**) podem ser convertidas em graus, minutos e segundos (WGS84)⁴⁸ através das seguintes funções de conversão em uma folha de cálculo .xls⁴⁹:

Equação 1 – Converter minutos decimais em graus (S, N)

$$fx = INT(ABS(min.decimal)/60)$$

Fonte: Elaborado pelo próprio

Equação 2– Identificar a latitude(S, N)

$$fx = IF(ABS(min.decimal) < 0; S; N)$$

Fonte: Elaborado pelo próprio

Equação 3– Converter minutos decimais em minutos (N)

$$fx = INT(MOD(ABS(min.decimal); 60))$$

Fonte: Elaborado pelo próprio

Equação 4– Converter minutos decimais em segundos (N)

$$fx = INT((ABS(min.decimal) – INT(ABS(min.decimal))) * 60)$$

Equação 5– Converter minutos decimais em graus (W, E)

$$fx = INT(ABS(min.decimal)/60)$$

Fonte: Elaborado pelo próprio

Equação 6– Identificar a Longitude (W, E)

$$fx = IF(min.decimal < 0; "W"; "E")$$

Fonte: Elaborado pelo próprio

Equação 7– Converter minutos decimais em minutos (W)

$$fx = INT(MOD(ABS(minuto decimal); 60))$$

⁴⁸ O formato WGS84 'World Geodesic System' é o sistema de coordenadas usado na aviação civil tal como consta do Anexo 15 da ICAO.

⁴⁹ As folhas de cálculo com extensão .xls podem ser trabalhadas no Microsoft Excel.

Fonte: Elaborado pelo próprio

Equação 8– Converter minutos decimais em segundos (*W*)

$$fx = \text{INT}((\text{ABS}(\text{min. decimal}) - \text{INT}(\text{ABS}(\text{min. decimal}))) * 60)$$

Fonte: Elaborado pelo próprio

Equação 9– Junção de latitude (*N*) e longitude (*W*) num ficheiro .xls.

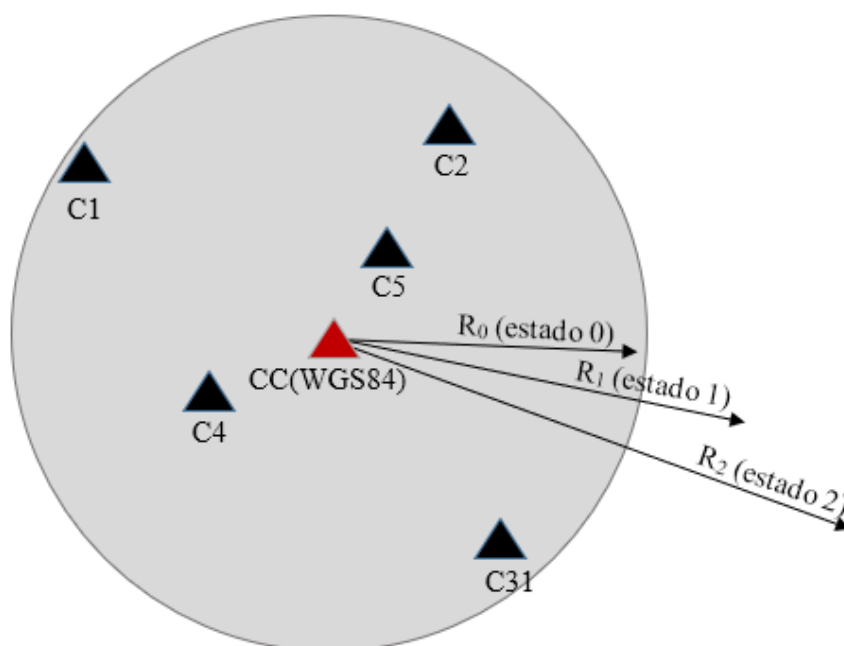
$$fxN = (Eq. 1) \& " \& (Eq. 2) \& " \& (Eq. 3) \& " \& (Eq. 4) \&$$

$$fxW = (Eq. 5) \& " \& (Eq. 6) \& " \& (Eq. 7) \& " \& (Eq. 8) \&$$

Fonte: Elaborado pelo próprio

As conversões foram aplicadas às coordenadas decimais agrupadas numa determinada zona que se repetiam. Foi obtida a coordenada do ponto médio na origem cujo o raio engloba as coordenadas projetadas referentes às trajetórias onde a probabilidade de encontrar uma aeronave tripulada é de 100%. A coordenada central obtida foi extraída de acordo com a posição na zona de controlo. Os dados dos raios foram usados para projetar os diferentes estados dinâmicos.

Figura 30 - Raio que engloba todos os dados projetados próximos



Fonte: Elaborado pelo próprio

A coordenada central (CCWGS84) do raio pode ser extraída através da informação do raio obtida na projeção cartesiana através da equação⁵⁰:

Equação 10– Equação da forma normal de um círculo num sistema de coordenadas

$$(x - CLat)^2 + (y - CLon)^2 = r^2$$

Fonte: Elaborado pelo próprio

O raio do círculo referente ao estado 1 e ao estado 2 foi calculado conhecendo a coordenada central do estado 0 e aplicando uma distância baseada na informação da velocidade máxima aplicável a aeronaves não tripuladas a operar na categoria aberta⁵¹. Foram usadas as fórmulas com o objetivo de identificar o raio do círculo a projetar nos diferentes estados:

Equação 11– Cálculo do raio no estado 1

$$r = \sqrt{(x - CLat)^2 + (y - CLon)^2} + (v \times 30)$$

Fonte: Elaborado pelo próprio

Equação 12– Cálculo do raio no estado 2

$$r = \sqrt{(x - CLat)^2 + (y - CLon)^2} + (v \times 60)$$

Fonte: Elaborado pelo próprio

4.2.3 – Métodos de cálculo, análise estatística e agrupamento

Os dados obtidos foram analisados em termos do número de ocorrências do dado, da posição e da variabilidade com o objetivo de agrupá-los em determinadas zonas

⁵⁰ O GoogleEarth tem uma função que permite extrair esse raio conhecendo a coordenada central.

⁵¹ As aeronaves não tripuladas com baixos requisitos técnicos, portanto com marcações de conformidade CE de acordo com o Regulamento Delegado (UE) 2019/945, não operarão em ambientes complexos, ou serão operadas com velocidade limitada de acordo com a zona geográfica e em modo de velocidade baixa (C2, 3 m/s), cativas (C3) ou fora de espaço aéreo controlado (C4). As aeronaves não tripuladas com marcação de conformidade C0, C1 e futuramente as com marcação C5 e C6 têm um limite máximo de 19 m/s. No estado 1 considera-se 30s de voo em afastamento e no estado 2 considera-se 60s de voo em afastamento, de forma a adaptar os tempos médios na literatura de um RA e um TA.

no espaço aéreo estudado. O valor do ponto CC obtido para os diferentes grupos foi projetado de forma a desenhar os polígonos referentes aos diferentes estados dinâmicos (0, 1 e 2).

Equação 13– Cálculo do número de ocorrências do dado na amostra

$$fx = COUNT(IF(IDn:IDn + 1,"D"),$$

no qual ID_n é o primeiro dado do intervalo, ID_{n+1} o último dado do intervalo e D o dado que se pretende saber quantas vezes está repetido na amostra

Fonte: Elaborado pelo próprio

Equação 14– Cálculo da taxa de ocorrência do dado na amostra

$$fx = (COUNT(IF(IDn:IDn + 1,"D")/NDI)X100,$$

no qual ID_n é o primeiro dado do intervalo, ID_{n+1} o último dado do intervalo, D é o dado que se pretende saber quantas vezes está repetido e NDI o número total de dados na amostra.

Fonte: Elaborado pelo próprio

Equação 15– Cálculo da média

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n xi,$$

no qual $\{xi\}_{i=1}^n$ é a sequência de números na amostra. A média aritmética foi calculada através da função

$$fx = MED(IDn:IDn + 1$$

Fonte: Elaborado pelo próprio

Equação 16– Cálculo da variabilidade

$$DP = \sqrt{\sum_{i=1}^n (xi - \bar{X})^2 / n},$$

No qual o desvio padrão (DP) foi calculado através da função

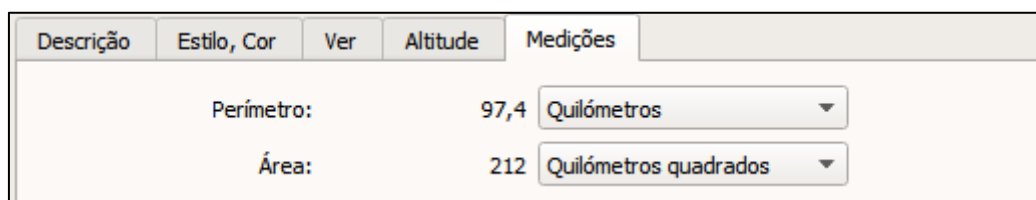
$$fx = DESVPAD.P(IDn:IDn + 1).$$

Fonte: Elaborado pelo próprio

As áreas dos polígonos projetados no GoogleEarth foram obtidas através da função de informação do elemento, disponível no próprio software. A informação pode ser acedida através do seguinte procedimento:

- Colocar o cursor sobre o polígono;
- Botão direito do rato;
- Propriedades;
- Botão esquerdo do rato;
- Medições:

Figura 31 - Exemplo da informação da área de um polígono projetado no Google Earth



Fonte: Google Earth

A informação da área dos polígonos referentes às áreas proibidas e de restrição operacional do Anexo do Regulamento da ANAC n.º 1093/2016, e às áreas dos polígonos projetados para os diferentes estados dinâmicos foram compilados em uma tabela. A informação foi usada para comparar os dois modelos em termos do ganho de otimização do uso do espaço aéreo para as operações de aeronaves não tripuladas, sendo esta otimização uma medida de eficiência de um modelo face a outro. A otimização foi calculada através da seguinte fórmula:

Equação 17– Otimização (OT) comparativa do espaço aéreo disponível para as operações abaixo de 120m de altura

$$OT(\%) = 100X \left(\frac{AE_{1093}}{AE_{Estado(n,n+1,n+2)}^{WCL}} \right),$$

no qual **AE** é a área equivalente, **1093** a área do Anexo ao Regulamento da ANAC n.º 1093/2016, **WCL** a área livre no respetivo Estado (**n**, ou **n+1** ou **n+2**).

Fonte: Elaborado pelo próprio

Equação 18 – Otimização (OT_t) total do espaço aéreo conferida pelo modelo estático do Anexo ao Regulamento da ANAC n.º 1093/2016 face à área da CTR

$$OT_t(\%) = 100X \left(\frac{AE_{1093}}{Actr} \right),$$

no qual **AE** é a área equivalente, **1093** a área do Anexo ao Regulamento da ANAC n.º 1093/2016, **Actr** a área total da CTR de Lisboa.

Fonte: Elaborado pelo próprio

Equação 19 – Otimização (OT_t) do espaço aéreo conferida pelo modelo dinâmico de WCL face à área da CTR

$$OT(\%) = 100X \left(1 - \left(\frac{AE_{WCL}^{Estado(n,n+1,n+2)}}{Actr} \right) \right),$$

no qual **AE** é a área equivalente, **WCL** a área livre no respetivo Estado (**n**, ou **n+1** ou **n+2**), **Actr** a área total da CTR de Lisboa.

Fonte: Elaborado pelo próprio

Equação 20 - Otimização ($OT_{WCL vs 1093}$) total do espaço aéreo conferida pelo modelo dinâmico de WCL no estado 2 face ao Regulamento da ANAC n.º 1093/2016

$$OT_{WCL vs 1093}(\%) = (((\%AE_{1093}) - (\%AE_{WCL}^{Estado(n+2)}))) X - 1,$$

no qual **%AE** é a área equivalente calculada referida na equação 18 e na equação 19.

Fonte: Elaborado pelo próprio

4.2.4– Pressupostos para garantia de RWCL nos estados

O pressuposto considera que face à envergadura das aeronaves tripuladas, o UAS nunca se possa encontrar a menos de uma distância em tempo de 30s no estado 1 (**n+1**) e 60s no estado 2 (**n+2**) do limite das zonas onde o risco de encontro é de 100% a F5 e F10, portanto do limite do estado 0 (**n**). Assume-se que o tempo é suficiente para serem ativados os procedimentos de contingência e os procedimentos de emergência pelo operador remoto em caso de degradação de sistemas ou de falha⁵², bem como os

⁵² A metodologia de análise de risco aplicável a aeronaves não tripuladas na categoria específica, publicada sobre a forma de AMC/GM ao Regulamento de Execução (EU) 2019/947, exemplifica no ponto 2.5.3. AMC1 ao artigo 11.º as falhas que possam levar à saída da geografia de voo. Analogamente poderá ser usado o mesmo racional para assegurar que a aeronave não tripulada é responsiva o suficiente para

procedimentos aplicáveis ao prestador de serviços UTM e ao prestador de serviços de tráfego aéreo. Foi usado para definir o tempo de separação para o cálculo do raio no estado 1 e no estado 2, como pressuposto, as separações em tempo descritas para os sistemas ACAS/TCAS referentes a RA (15 a 35s antes do CPA) e TA (8 a 15s antes do RA), tal como referido na literatura (ICAO, 2006c, p. 124), pese embora estes sistemas estejam inibidos a 1000' (ICAO, 2006c, p. 112)⁵³. No entanto, considerando o âmbito da dissertação, o objetivo é apenas ter um mecanismo que permita calcular a distância que garanta o WCL relativamente ao ponto (CPA) onde a probabilidade de encontro é 100% (estado 0). No estado 1 definiu-se um tempo de voo de 30s e para o estado 2 um tempo de voo de 60s, admitindo que a velocidade máxima permitida da aeronave não tripuladas é 19 m/s (UE 2019/945, parte 2.^a).

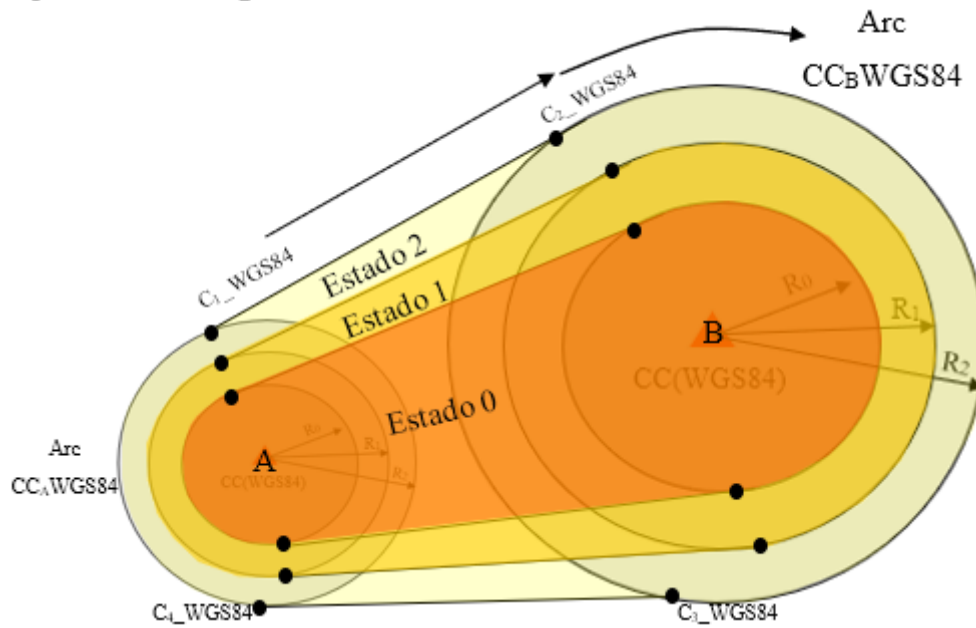
4.2.5 – Projeção dos círculos e dos polígonos

Os círculos obtidos através dos cálculos dos raios nos diferentes estados foram projetados no Google Earth, fixando a coordenada central calculada e definindo o raio correspondente em metros. Os círculos formados pelos raios calculados no estado equivalente em cada coordenada central foram unidos através de rectas tangentes que intersecam cada um dos círculo apenas em um ponto. Após esse ponto o polígono segue um arco (Arc) no sentido do ponteiro do relógio.

responder aos estados, dando garantias que as falhas nunca sejam superiores a 1×10^{-4} (não sair da geografia de voo projetada para o estado em questão em 10.000 horas de voo).

⁵³ Segundo o ICAO Doc. 9863, ponto 3.21.1.6.1 e ponto 3.21.1.7, p. 112, 'All RAs are inhibited below 1 000 ft above ground level (AGL)' e 'Aural annunciations are inhibited below 500 ft AGL' respetivamente.

Figura 33 – Representação da elaboração dos polígonos referentes ao estado 0, 1 e 2



Fonte: Elaborado pelo próprio

CAPÍTULO 5: ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 – Ocorrências e o padrão das trajetórias a 1000'e 500' AGL

Os resultados obtidos mostram que a percentagem de ocorrências de um determinado dado é significativa na final da aproximação à pista 03, sendo que esses dados representam 56,2% a F10, e 89,52% a F5. Os dados em que a descida não ocorre diretamente na final representam 43,8% a F10 e apenas 10,48%. A F10 ocorre ainda 2,02% de trajetórias fora do padrão expectável. Os dados agrupam-se da seguinte forma:

- **CCWGS84_F10_FINAL_RWY03:** 56,20%;
- **CCWGS84_F10_PB_ESQ_RWY21_AC:** 43,80%;
- **CCWGS84_F10_PB_ESQ_RWY21_H:** 2,02%.

Tabela 7 – Número e percentagem de ocorrências dos dados de Lat e Long a F10 na CTR de Lisboa

F10/n.º	#13 Lat	#14 Lon	% Ocorrência	Grupo CC
26	2324,433	-549,2	0,85%	CCWGS84_F10_FINAL_RWY03
169	2324,55	-549,133	5,52%	CCWGS84_F10_FINAL_RWY03
560	2324,933	-548,917	18,29%	CCWGS84_F10_FINAL_RWY03
945	2325,033	-548,867	30,86%	CCWGS84_F10_FINAL_RWY03
1	2325,05	-548,967	0,03%	CCWGS84_F10_FINAL_RWY03
18	2325,45	-548,633	0,59%	CCWGS84_F10_FINAL_RWY03
1	2325,5	-548,6	0,03%	CCWGS84_F10_FINAL_RWY03
1	2325,6	-549,7	0,03%	CCWGS84_F10_FINAL_RWY03
29	2326,7	-546	0,95%	CCWGS84_F10_PB_ESQ_RWY21_H
13	2326,7	-545,95	0,42%	CCWGS84_F10_PB_ESQ_RWY21_H
11	2326,783	-545,317	0,36%	CCWGS84_F10_PB_ESQ_RWY21_H
8	2326,783	-545,25	0,26%	CCWGS84_F10_PB_ESQ_RWY21_H
8	2327,45	-547,533	0,26%	CCWGS84_F10_PB_ESQ_RWY21_AC
8	2327,5	-547,517	0,26%	CCWGS84_F10_PB_ESQ_RWY21_AC
1	2327,567	-545,617	0,03%	CCWGS84_F10_PB_ESQ_RWY21_H
201	2327,95	-547,283	6,56%	CCWGS84_F10_PB_ESQ_RWY21_AC
1061	2328,017	-547,25	34,65%	CCWGS84_F10_PB_ESQ_RWY21_AC
1	2328,033	-547,317	0,03%	CCWGS84_F10_PB_ESQ_RWY21_AC

Fonte: Elaborado pelo próprio

Tabela 8 – Número e percentagem de ocorrências dos dados de Lat e Long a F5 na CTR de Lisboa

F5/n.º	#13 Lat	#14 Lon	% Ocorrência	Grupo CC
1089	2325,95	-548,333	25,53%	CCWGS84_F5_RWY03_02
2730	2325,983	-548,317	63,99%	CCWGS84_F5_RWY03_02
75	2326,533	-547,367	1,76%	CCWGS84_F5_RWY03_01
30	2326,533	-547,35	0,70%	CCWGS84_F5_RWY03_01
2	2326,717	-547,45	0,05%	CCWGS84_F5_RWY03_01
9	2326,733	-547,433	0,21%	CCWGS84_F5_RWY03_01
1	2326,8	-547,867	0,02%	CCWGS84_F5_RWY03_01
34	2326,95	-547,8	0,80%	CCWGS84_F5_RWY03_01
295	2326,967	-547,783	6,92%	CCWGS84_F5_RWY03_01
1	2326,983	-547,8	0,02%	CCWGS84_F5_RWY03_01

Fonte: Elaborado pelo próprio

Relativamente aos resultados a F5, os mesmos permitiram agrupar os dados em dois grupos distintos:

- CCWGS84_F5_RWY03_02: 89,52%
- CCWGS84_F5_RWY03_01: 10,48%.

Os resultados parecem ser coerentes pois é expectável que a alturas mais baixas o desvio ao azimuth e à ladeira são menores face à proximidade da soleira da pista, pelo que, por razões de performance das aeronaves, especialmente aquelas de asa fixa, esse dado da trajetória terá de estar concentrado num determinado ponto sob pena de esta não estar alinhada com a faixa de aterragem.

Tabela 9 – Número e percentagem de ocorrências dos dados de Lat e Long a F0 medidos para as trajetórias iniciadas em F5 na CTR de Lisboa

F0/n.º(F10)	#13 Lat	#14 Lon	% Ocorrência	Grupo CC
535	2325,95	-548,333	17,47%	CCWGS84_F0_F10_RWY03_01
956	2325,983	-548,317	31,22%	CCWGS84_F0_F10_RWY03_01
1265	2326,45	-548,05	41,31%	CCWGS84_F0_F10_RWY03_01
40	2326,533	-547,367	1,31%	CCWGS84_F0_F10_RWY03_02
20	2326,533	-547,35	0,65%	CCWGS84_F0_F10_RWY03_02

1	2326,733	-547,433	0,03%	CCWGS84_F0_F10_RWY03_02
1	2326,8	-547,867	0,03%	CCWGS84_F0_F10_RWY03_01
22	2326,95	-547,8	0,72%	CCWGS84_F0_F10_RWY03_01
221	2326,967	-547,783	7,22%	CCWGS84_F0_F10_RWY03_01
1	2326,983	-547,8	0,03%	CCWGS84_F0_F10_RWY03_01

Fonte: Elaborado pelo próprio

Os resultados relativos às trajetórias a F0, obtidas dos dados de **Lat e Lon** final a F5 e F10 apresentam valores ligeiramente diferentes, no entanto os dados das trajetórias apresentam algumas diferenças. Os dados de F5 mostram que a F0 a ocorrência é de 100%, ou seja em 8534 voos, o dado da trajetória coincide com a superfície da pista, estando essas trajetórias alinhadas com a mesma. Os dados das trajetórias a F0 obtidos de F10 agregam-se em dois grupos, um alinhado com a pista no qual as trajetórias coincidem em 98,00%. O outro grupo é referente a 2% das trajetórias e está a alguma distância da faixa de aterragem, podendo estar relacionado com dados de aeronaves de asa rotativa, vulgo helicópteros.

Os resultados de F0 foram agrupados em três grupos:

- **CCWGS84 F0_F10_RWY03_01:** 98,00%;
- **CCWGS84 F0_F10_RWY03_02:** 2,00%
- **CCWGS84 F0_F5_RWY03:** 100,00%

Tabela 10- – Número e percentagem de ocorrências dos dados de Lat e Long a F0 medidos para as trajetórias iniciadas em F5 na CTR de Lisboa

F0/n.º(F5)	#13 Lat	#14 Lon	% Ocorrência	Grupo CC
8534	2326,45	-548,05	100,00%	CCWGS84_F0_F5_RWY03

Fonte: Elaborado pelo mestrando

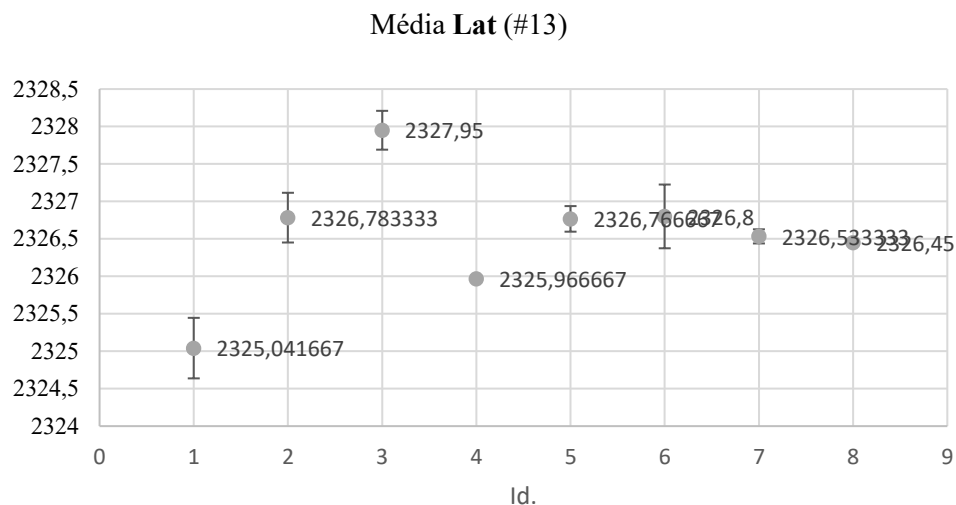
Tabela 11 – Coordenadas centrais obtidos através da média dos dados agrupados e a respetiva variabilidade (DP)

Id	Coordenada central (CCWGS84)	Média Lat (#13)	Desvio Padrão Lat (#13)	Média Lon (#14)	Desvio Padrão Lon (#13)
1	CCWGS84 F10_FINAL_RWY03	2325,041667	0,404096941	-548,941667	0,329397332
2	CCWGS84 F10_PB_ESQ_RWY21_H	2326,783333	0,332097892	-545,616667	0,310483425
3	CCWGS84 F10_PB_ESQ_RWY21_A C	2327,95	0,259186758	-547,316667	0,12036981
4	CCWGS84 F5_RWY03_02	2325,966667	0,0166665	-548,325	0,008333
5	CCWGS84 F5_RWY03_01	2326,766667	0,170769916	-547,6166665	0,20965208
6	CCWGS84 F0_F10_RWY03_01	2326,8	0,425478321	-547,866667	0,226228081
7	CCWGS84 F0_F10_RWY03_02	2326,533333	0,094280904	-547,366667	0,036003909
8	CCWGS84 F0_F5_RWY03	2326,45	0	-548,05	0

Fonte: Elaborado pelo mestrando

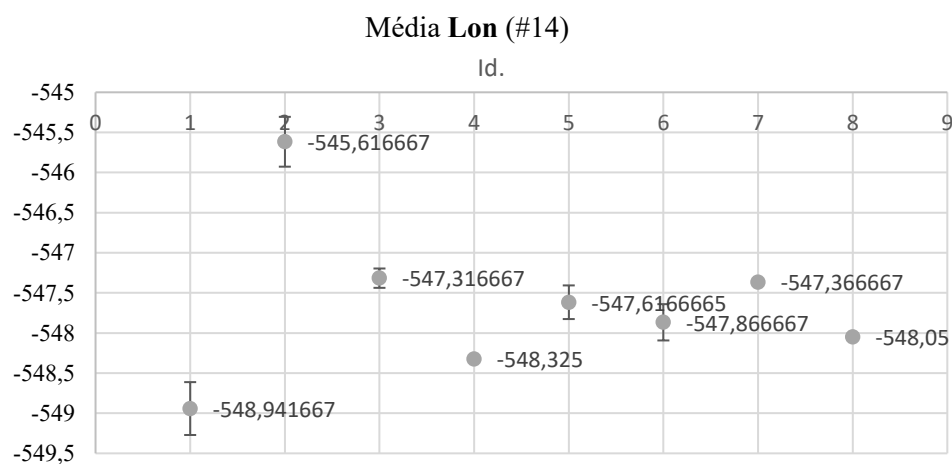
Os grupos foram constituídos de acordo com o desvio padrão na **Lat** e **Long**. O DP máximo para a **Lat** de F10 foi de 0,50 nas zona alinhada com a final, 0,35 na zona H e 0,3 na zona AC. Relativamente à **Lon** o DP máximo permitido foi de 0,35. O DP no grupo F5 na **Lat** da zona 01 foi 0,1 e na zona 02 0,2. A **Lon** apresentou uma DP inferior 0,01 na zona 2 e 0,25 na zona 1. O DP dos grupos constituídos são muito baixos, pelo que estes permitem definir com precisão as zonas específicas onde passam as trajetórias das aeronaves a efetuarem aproximações para o aeroporto Humberto Delgado.

Gráfico 1 – Média e desvio padrão dos valores agrupados da *Lat*.



Fonte: Elaborado pelo próprio

Gráfico 2 – Média e desvio padrão dos valores agrupados da *Lon*.



Fonte: Elaborado pelo próprio

O valor da coordenada média em minutos decimais e o respetivo DP foram convertidos para o sistema WGS84. O estado 0 corresponde à área LoWCL definida pelo círculo com raio centrado na coordenada central. Caso as aeronaves não tripuladas operem a menos do raio estabelecido na tabela 12 no estado 0 a probabilidade de encontro (AEC) é assumida como sendo de 100%, pois todos os dados das trajetórias encontram-

se dentro desse círculo estabelecido a partir da CCWGS84. As zonas do espaço aéreo da zona de controlo onde o AEC é 100% são:

- **CCWGS84 F10_FINAL_RWY03:** Em um raio de 1390 m centrado na coordenada central 38° 45' 05.26" N 9° 9' 06.91" W, no qual o raio aumenta 70,9% no estado 1 e 77,4% no estado 2;
- **CCWGS84 F10_PB_ESQ_RWY21_AC:** Em um raio de 907,39m centrado na coordenada central 38° 47' 05.75" N 9° 5' 41.52" W, no qual o raio aumenta 61,4% no estado 1 e 72,1% no estado 2;
- **CCWGS84 F10_PB_ESQ_RWY21_H:** Em um raio de 592,6m centrado na coordenada central 38° 47' 43.44" N 9° 7' 23.10" W; no qual o raio aumenta 50,9% no estado 1 e 67,1% no estado 2;
- **CCWGS84 F5_RWY03_02:** Em um raio de 49,83m centrado na coordenada central 38° 45' 56.95" N 9° 8' 20.04" W, no qual o raio aumenta 8,3% no estado 1 e 52,1% no estado 2;
- **CCWGS84 F5_RWY03_01:** Em um raio de 56,66m centrado na coordenada central 38° 46' 43.95" N 9° 7' 35.48" W, no qual o raio aumenta 48% no estado 1 e 65,7% no estado 2.

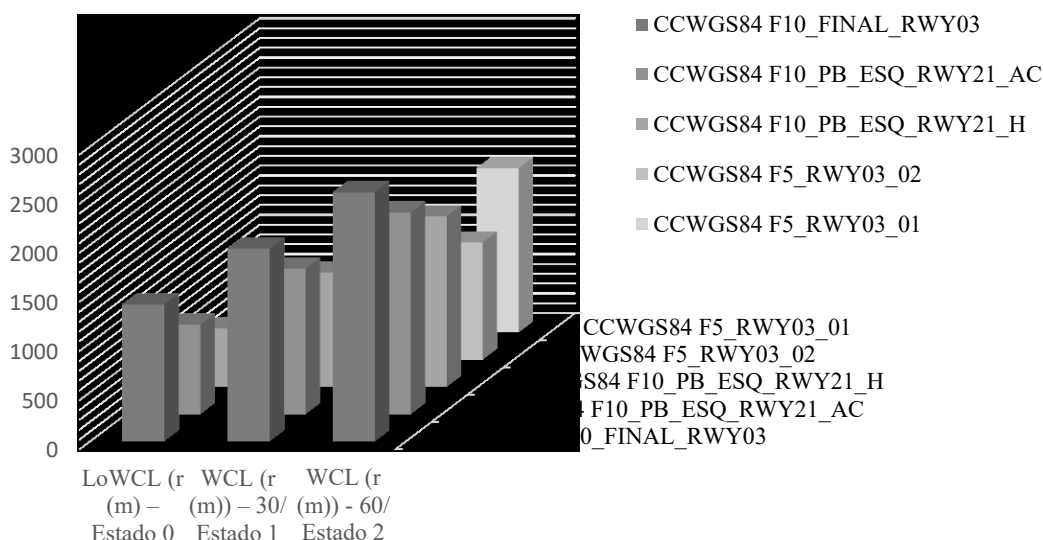
Tabela 12 – Coordenadas centrais no formato WGS84 e os respetivos raios dos círculos em metros referentes aos diferentes estados dinâmicos

	CC _{WGS83}	LoWCL (r (m)) – Estado 0	WCL (r (m)) – 30/ Estado 1	WCL (r (m)) - 60/ Estado 2
CCWGS84 F10_FINAL_RWY03	38 45 05.26 N 9 9 06.91 W	1390	1960	2530
CCWGS84 F10_PB_ESQ_RWY21_AC	38 47 05.75 N 9 5 41.52 W	907,39	1477,39	2047,39
CCWGS84 F10_PB_ESQ_RWY21_H	38 47 43.44 N 9 7 23.10 W	592,6	1162,6	1732,6
CCWGS84 F5_RWY03_02	38 45 56.95 N 9 8 20.04 W	49,83	619,83	1189,83
CCWGS84 F5_RWY03_01	38 46 43.95 N 9 7 35.48 W	526,66	1096,66	1666,66

Fonte: Elaborado pelo próprio

Gráfico 3 – Variação dos raios entre os estados WCL onde o AEC é 100% (estado 0) e os estados dinâmicos 1 e 2

Variação do raio entre os Estados WCL



Fonte: Elaborado pelo próprio

Os resultados mostram que a variação dos raios entre os estados é menor quanto menor for a altitude. Este resultado é coerente com os dados do DP obtido para F5 em comparação com o DP obtido em F10. A área a F10 onde o AEC é 100% é maior do que as áreas a F5 onde a AEC é 100%. O resultado indica que o modelo projeta-se em patamares, onde abaixo dessa altitude, podem existir operações limitadas a uma determinada altitude⁵⁴ em zonas próximas à faixa de aterragem (Gráfico 3).

A WCL no estado 2 é maior do que a WCL no estado 1 e 0, indicando que é possível manter uma distância de segurança considerável da zona onde o AEC é de 100% a F5 e F10, baseada nos dados de trajetórias reais das aeronaves. A distância assegura que o risco de encontro é nulo caso a operação ocorra fora dos raios das coordenadas centrais. Em comparação com os modelos para assegurar a separação entre aeronaves explorados na bibliografia, os estados dinâmicos indicam que no estado 2, considerando

⁵⁴ O Anexo do Regulamento da ANAC n.º 1093/2016, de 14 de dezembro, está concebido da mesma forma, diminuindo a restrição em altura das operações de aeronaves não tripuladas de acordo com a distância à zona proibida.

exclusivamente os dados das trajetórias analisadas⁵⁵, o AEC seria hipoteticamente 0% para uma aeronave não tripulada a F10 desde que esta mantenha a mais de 2530m da coordenada central **CCWGS84_F10_FINAL_RWY03**.

5.2 – Projeção do padrão das trajetórias

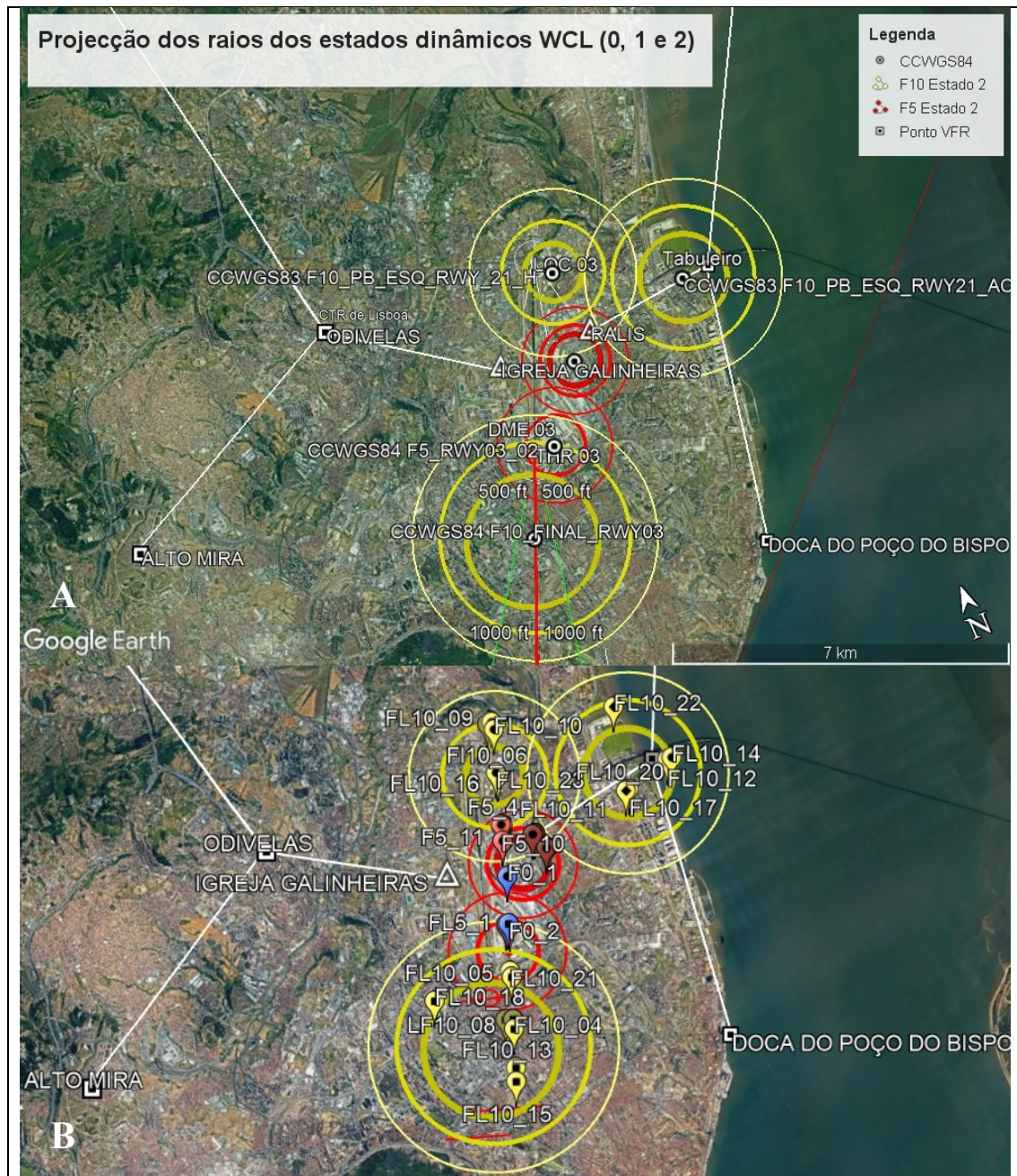
Os resultados obtidos projetados do estado 0 cobrem uma zona reduzida da CTR de Lisboa. Os círculos internos correspondem ao estado 0, a zona geográfica da CTR onde a probabilidade de ocorrer um encontro com uma aeronave é assumida como 100%. É importante referir que essa probabilidade é inferior a esse valor pois nem todas as trajetórias a um dado momento passam a F5 e F10 exatamente mesmo lugar. A perfuração da camada pela trajetória pode ocorrer em lugares distintos. Por exemplo, entre 21 de junho de 2018 e 18 de junho de 2018, o AEC no estado 0 referente ao círculo cujo o centro é **CCWGS84_F10_PB_ESQ_RWY21_H** foi de apenas 2%. No entanto devido a esta zona ser coincidente com os pontos de reporte da rota de helicópteros (Tabuleiro-Ralis), para efeitos do estudo considera-se que este os encontros entre aeronaves tripuladas e não tripuladas são plausíveis, caso estas últimas operem entre F5 e F10, logo tem de ser assegurado um WCL dinâmico.

Os círculos com centro em **CCWGS84_F10_PB_ESQ_RWY21_H** e **CCWGS84_F10_PB_ESQ_RWY21_AC** sugerem que as descidas abaixo de F10 ocorrem a uma distância próxima do aeroporto, podendo dever-se às rotas de helicópteros ou a aeronaves que efetuem uma aproximação visual à pista, não publicada, a Este⁵⁶ do aeroporto.

⁵⁵ O estudo apenas abordou os dados das trajetórias de aeronaves tripuladas equipadas com transponder modo S e ADS-B, conjugado com as trajetórias de multilateração, cujo perfil de voo entrou na CTR de Lisboa para aterrar na pista 03, incluindo o tráfego em aproximação visual e os helicópteros a efetuarem voos nas rotas visuais de helicópteros. Não estão refletidas as aproximação ao Heliporto Hospitalar de Santa Maria, ao Heliporto de Alfragide, ao Heliporto hospitalar de Carnaxide, ao Heliporto de Algés, ao Heliporto de Salemas e ao Heliporto Hospitalar Garcia de Horta. As operações nestes heliportos não são alvo de medidas de gestão de fluxo e os planos de voo são apenas submetidos localmente na região de informação de voo, não sendo os dados incluídos no repositório DDR.

⁵⁶ Ponto cardeal.

Figura 34– Zona geográfica onde as aeronaves tripuladas descem abaixo de F10 e F5 com as coordenadas CC (A) e perfurações nas camadas (B)



Fonte: Elaborado pelo próprio

Os valores elevados para o ponto **CCWGS84_F10_PB_ESQ_RWY21_AC** são incoerentes na medida que não seria esperado um valor tão elevado para esse local. Não existe uma explicação óbvia para o valor. O mesmo pode ser causado por um erro da base de dados que agrega as aproximações para a RWY03 em um ponto oposto, ou poderá eventualmente estar relacionado com as aproximações à RWY21. A RWY 21 não foi alvo

do presente estudo. Os resultados parecem também indicar que ocorre uma acumulação de desvios das coordenadas WGS84 face ao local onde é expectável que esta ocorra na projeção. Estes erros podem ser causados devido à acumulação de erros dos próprios sistemas de recolha e às conversões sucessivas que são efetuadas durante a produção, armazenamento e processamento do meta dado. O alinhamento dos dados é consistente, no entanto esse alinhamento encontra-se a cerca de $420 \pm 54,7$ m à direita da linha central de RWY03. O desvio é causado por um desalinhamento da **Lat** nos metadados do repositório DDR2. Apesar de em rota este desvio ser insignificante, pois as separações asseguradas entre aeronaves tripuladas é de 3NM (5.6Km) na CTA (zona terminal), o mesmo tem um impacto significativo nas coordenadas centrais projetadas que foram estabelecidas a partir da análise e conversão desses dados, com o objetivo de definir WCL racionais de forma a assegurar a separação entre estas aeronaves e as aeronaves não tripuladas a operar na vizinhança. Não foi calculado o fator de compensação da **Lat**, no entanto, para efeitos da projeção dos polígonos, os círculos dos estados calculados devem ser movidos 420m para a esquerda. Considerando que a largura da RWY03/21 é 45 metros, o DP de 54,7m é praticamente coincidente com a largura da faixa de aterragem.

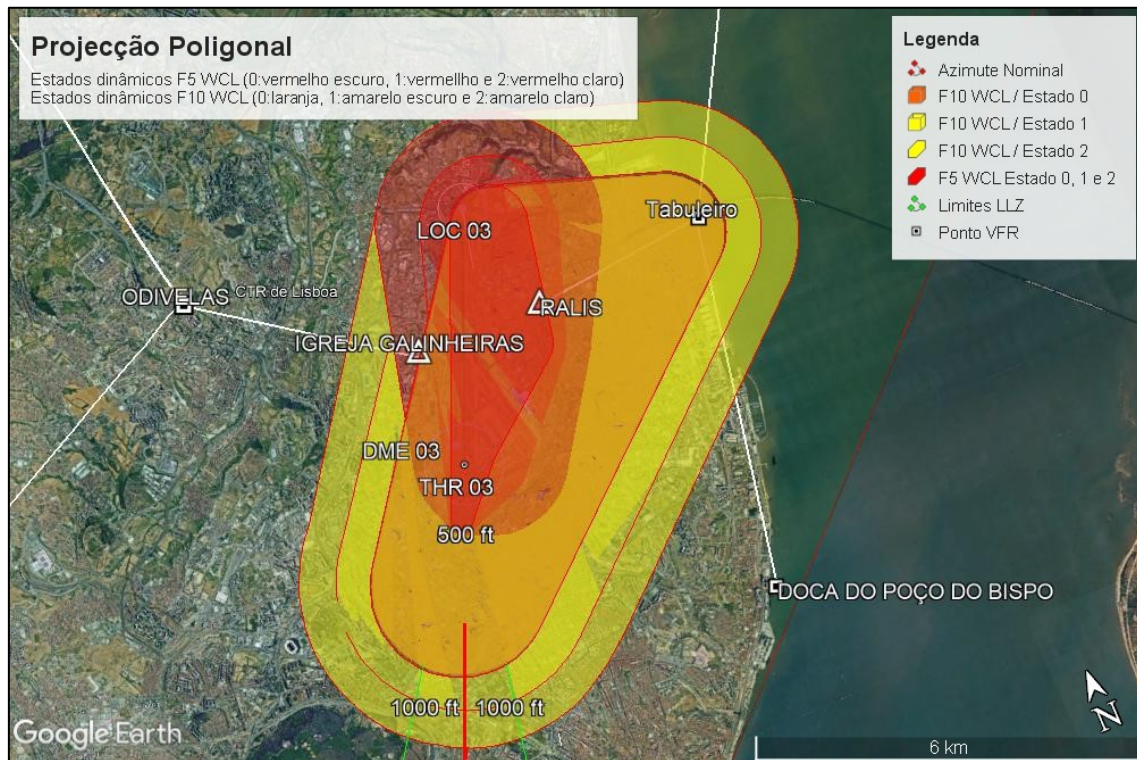
5.3 – Projeção do WCL dinâmico e a otimização do espaço aéreo

5.3.1 – Estado 0, 1 e 2 de WCL

Os dados projetados permitiram elaborar 6 polígonos referentes a 3 estados dinâmicos com o objetivo de assegurar uma WCL entre aeronaves não tripuladas e aeronaves tripuladas a efetuar manobras de aterragem. A mudança de estado dependerá da existência de um pacote de informação a ser partilhado com a aeronave não tripulada. No estado 0 não existem aeronaves tripuladas em aproximação, pelo que as aeronaves não tripuladas podem operar fora do limite do polígono F5 WCL / Estado 0 abaixo dos 500'(150m) de altura acima da superfície da RWY 03, pois os dados das trajetórias indicam que é improvável um encontro neste estado, mesmo que estivessem a ocorrer aproximações. O estado 0 é um garante de segurança caso aconteçam operações de aeronaves tripuladas não cooperantes, com comportamentos aberrantes ou incapazes de

partilhar informação, sendo desconhecidas de qualquer um dos prestadores de serviços no espaço aéreo em questão.

Figura 35– *Projeção dos estados dinâmicos 0, 1 e 2 a F5 e F10*



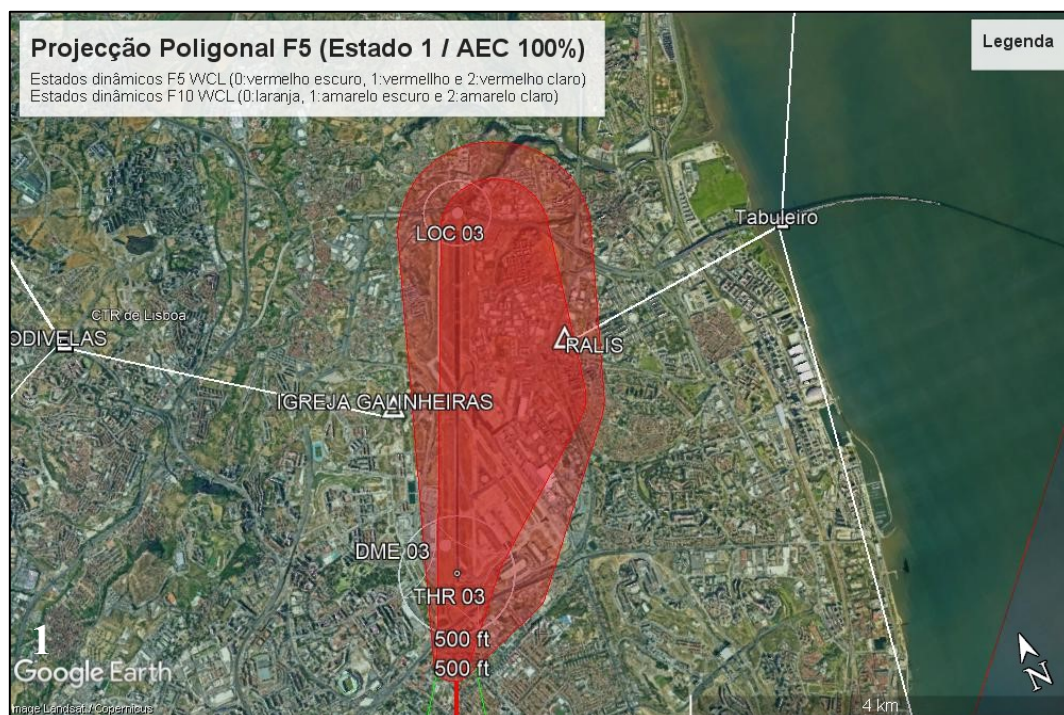
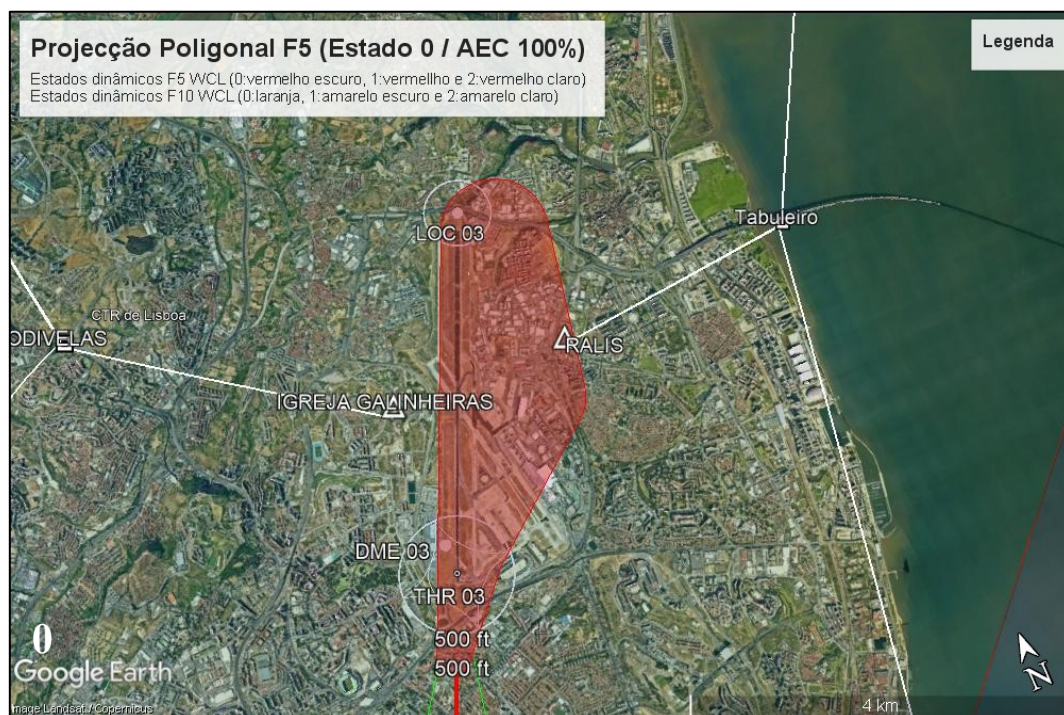
Fonte: Elaborado pelo próprio

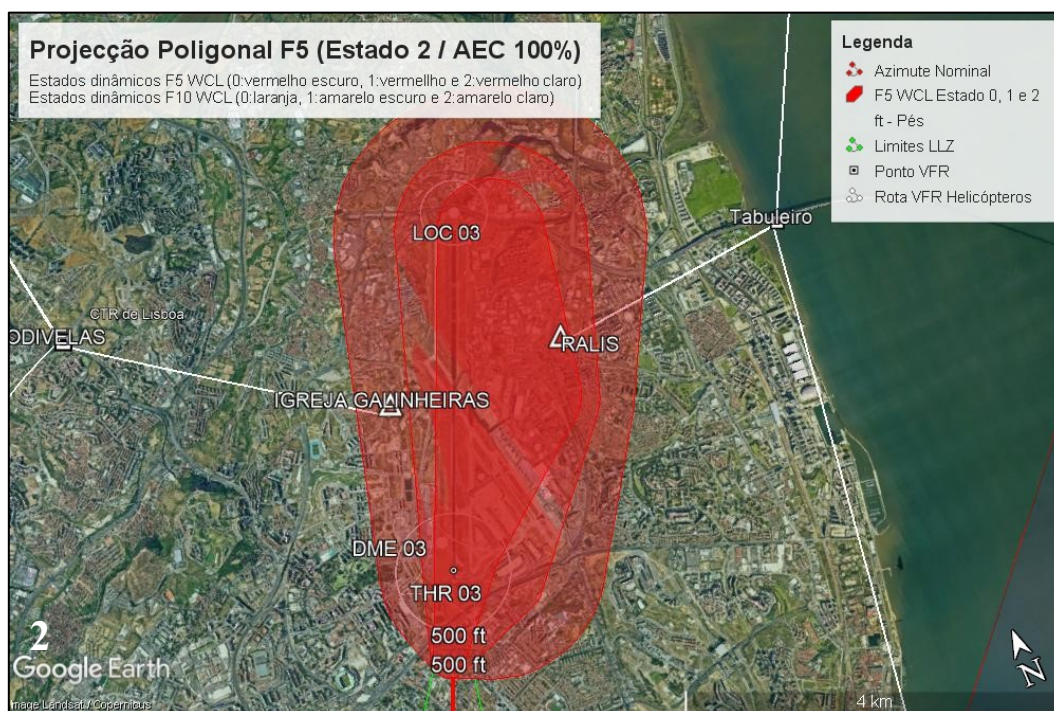
A F10 WCL / Estado 0, hipoteticamente, podem operar aeronaves não tripuladas fora dos limites do polígono a 400' (120m) acima da superfície, sem qualquer risco de encontro com aeronaves não tripuladas. No estado 0 as operações UAS podem ocorrer a alturas mais elevadas na zona de controlo e relativamente próximas da infraestrutura aeroportuária.

A mudança para o estado 1, implica que aconteça uma mudança no espaço aéreo que despolete um sinal sobre a forma de um pacote de informação para a aeronave não tripulada. A mudança de estado aumenta a restrição nas operações. O alargamento da F5 e F10 leva a que as operações apenas possam ocorrer a uma distância maior, face ao aumento da área, de forma a garantir que em caso de uma falha crítica ou única do

equipamento, a probabilidade da aeronave não tripulada atingir a F5 e F10 do estado 0 é reduzida.

Figura 36 – Alteração dinâmica da WCL em F5 (estado 0, 1 e 2)

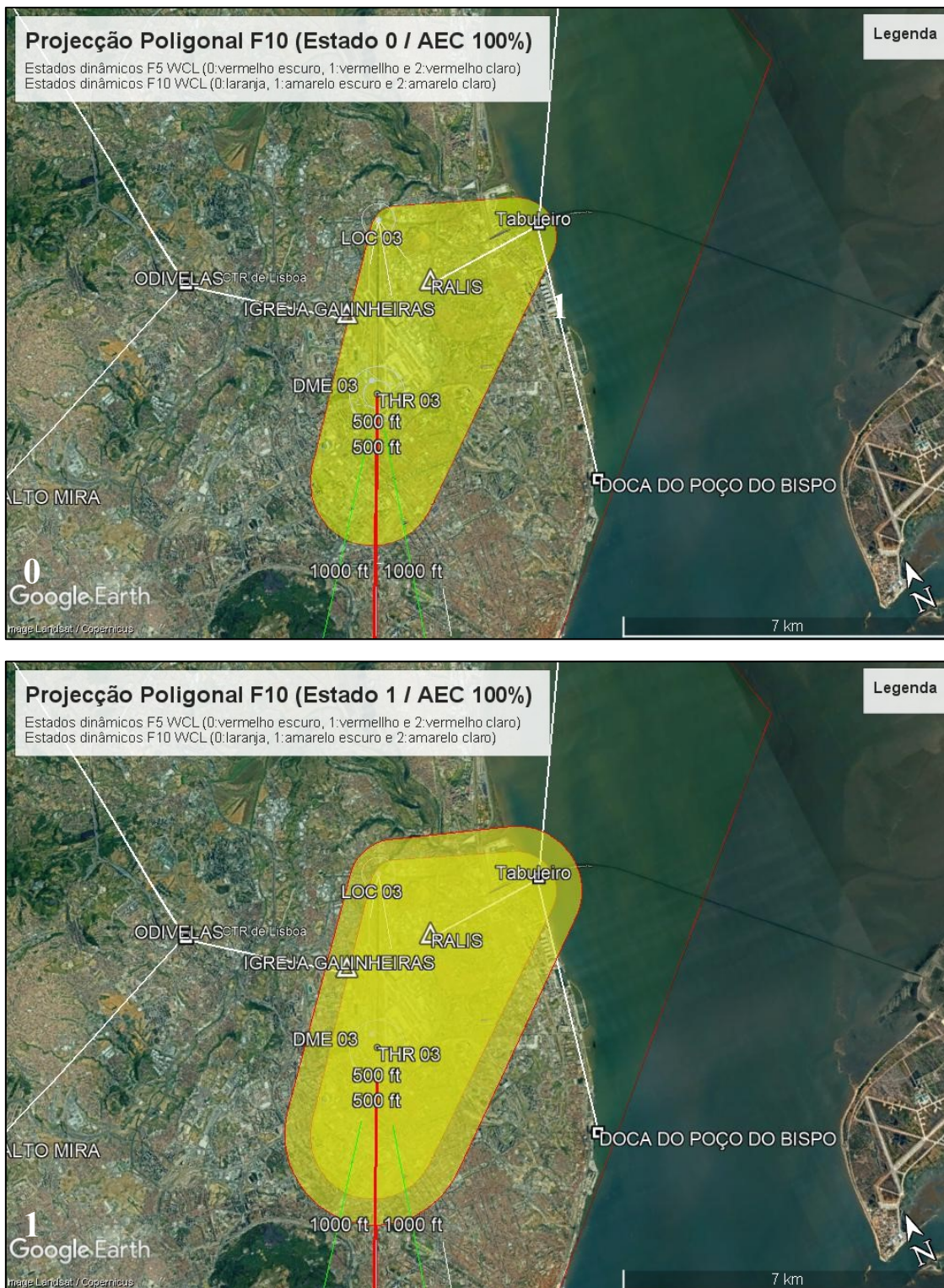


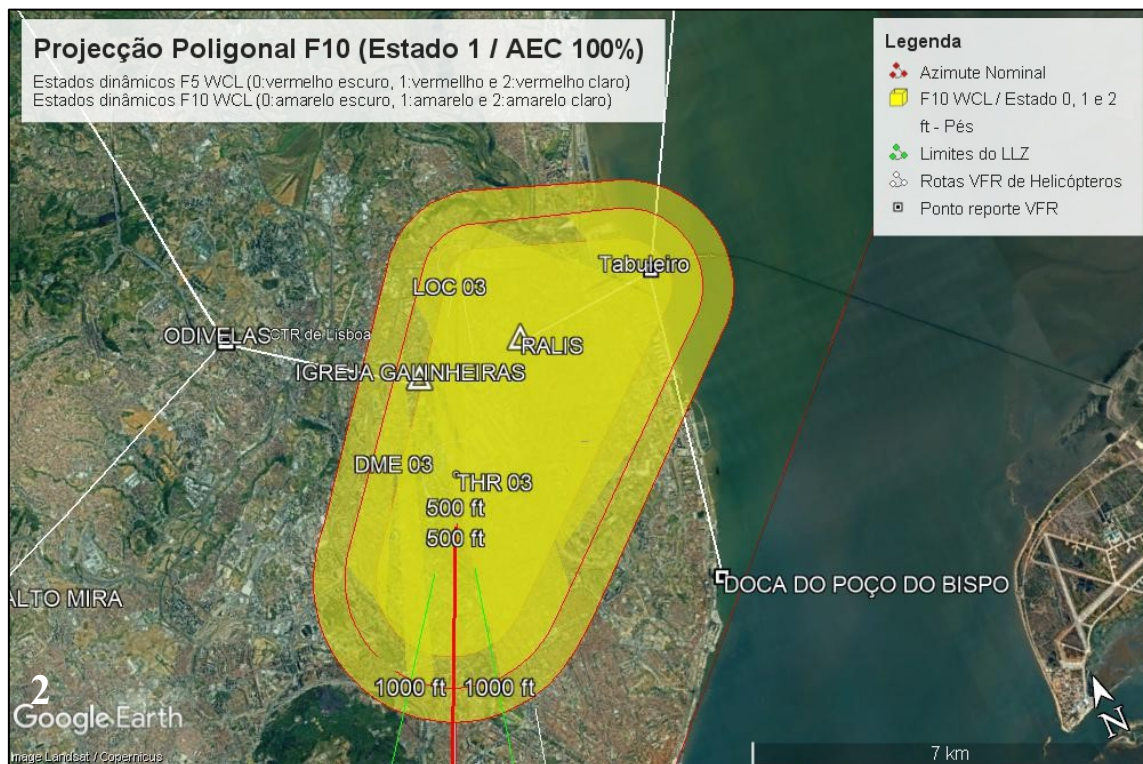


Fonte: Elaborado pelo próprio

A mudança de estado está dependente dos pacotes de informação que são enviados aos UAS de forma a despoletar essa mudança. Esses pacotes de informação são essenciais para levar ao aumento das áreas e devem ser dependentes da proximidade das aeronaves a um determinado ponto de decisão. Quanto maior a proximidade dessas aeronaves, maior será o estado dinâmico, tal como demonstrado nas figuras.

Figura 37– Alteração dinâmica da WCL em F10 (estado 0, 1 e 2)

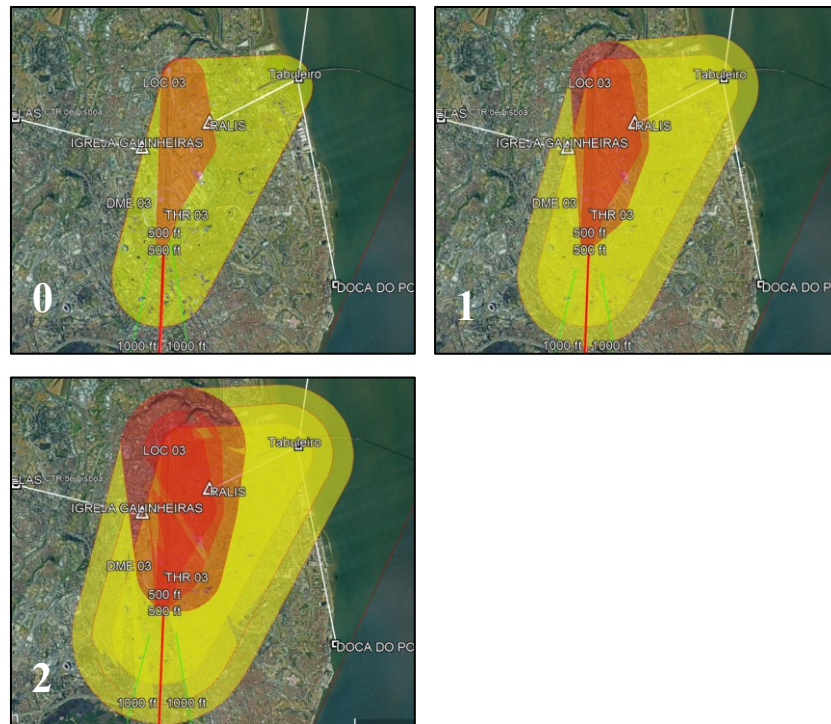




Fonte: Elaborado pelo próprio

A alteração dinâmica do estado 0 e F5 e F10 deve ocorrer em simultâneo. As projeções mostram que as áreas de cobertura das duas áreas aumentam de acordo como o incremento do estado. No estado 0, 1 e 2 em F5, não podem ocorrer operações de aeronave não tripuladas no interior. O incremento gradual permitirá que as aeronaves tripuladas tenham o tempo necessário para planear e adotar perfis de voo evasivos.

Figura 38– Alteração dinâmica simultânea em F5 e F10 de acordo com o estado 0, 1 e 2



Fonte: Elaborado pelo próprio

5.3.2 – Otimização do uso do espaço aéreo

Paralelamente, efetuou-se um estudo de comparação do espaço aéreo disponível para o uso de aeronaves não tripuladas na zona de controlo abaixo de 400' (120m), considerando as áreas dinâmicas e comparando-as com as áreas estáticas estabelecidas no Anexo do Regulamento da ANAC n.º 1093/2016. O objetivo é verificar se o dinamismo introduzido traz, além do método para garantir a separação através de uma WCL, benefícios em termos de otimização do uso e eficiência do espaço aéreo, considerando que estas operações devem ocorrer integradas. Os resultados obtidos parecem estar de acordo com o que era esperado, pois as áreas estáticas estabelecidas no regulamento são de grandes dimensões e restringem o acesso ao espaço aéreo às operações de aeronaves não tripuladas.

O uso do método dinâmico no estado 0 permite otimizar o acesso a determinadas zonas da atual zona proibida em 90,35%. Ou seja, o dinamismo introduzido pelo método

conceptualizado permite o acesso a áreas onde não podem ocorrer operações de aeronaves não tripuladas. Esse valor diminui apenas para 83,04% no estado 1 e para 69,12% no estado 2. O resultado indica que é garantido o acesso em segurança a 69,12% da área estática proibida atual, mesmo que estejam a ocorrer aproximação sucessivas à RWY 03. Comparando com a área 1 o estado 2 permite o acesso a 59,85% da área 2, com as devidas limitações de altura. Pelo resultado da projeção, as áreas dinâmicas no estado 2 expandem-se no máximo até à área 1 de proteção operacional.

Tabela 13 – Otimização percentual do espaço aéreo acessível aos UAS pelo modelo dinâmico comparativamente com as áreas estáticas

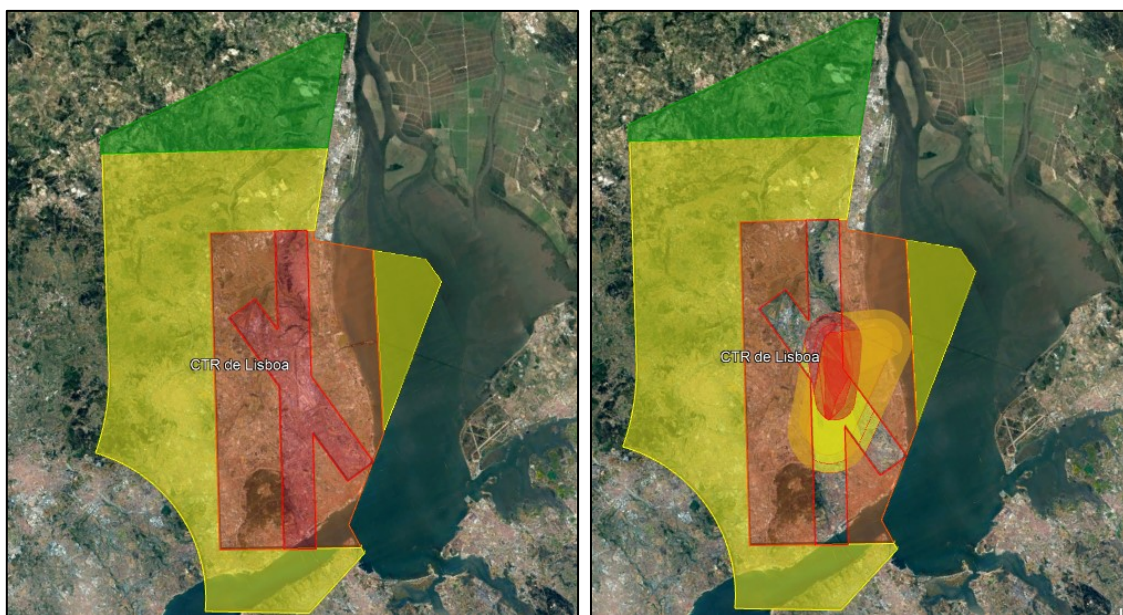
Área de proteção* / estado dinâmico de WCL**	Regulamento ANAC (Km²)*	WCL dinâmica (Km²)**	Otimização percentual do espaço aéreo UAS (km²)
Proibida / F5 estado 0	57	5,5	90,35%
Proibida / F5 estado 1	57	9,67	83,04%
Proibida / F5 estado 2	57	17,6	69,12%
Área 1 / F10 estado 0	134	25,8	80,75%
Área 1 / F10 estado 1	134	38,2	71,49%
Área 1 / F10 estado 2	134	53,8	59,85%
Área 2 / F10 estado 0	237,4	0	100,00%
Área 2 / F10 estado 1	237,4	0	100,00%
Área 2 / F10 estado 2	237,4	0	100,00%
Área 3 / Sem correlação F5 e F10	59,3	0	100,00%
120m*/**	39,4	0	100,00%

Fonte: Elaborado pelo próprio

Os benefícios das áreas dinâmicas são bem visíveis na percentagem de acesso ao espaço aéreo na zona de controlo até 400'(120m) de altura. As operações podem ser efetuadas a essa altura em 88,97% da zona de controlo sem qualquer risco de encontro

com uma aeronave tripulada, (gráfico 4)partindo do pressuposto que as mesmas realizam a navegação em cumprimento para com as alturas mínimas de voo, adicionalmente efetuando as descidas de aterragem nos locais apropriados.

Figura 39– Comparação da dimensão da projeção das áreas estáticas estabelecidas no anexo ao Regulamento da ANAC n.º 1093/2016 (à esquerda) sobrepostas com as áreas dinâmicas no estado 0, 1 e 2 (à direita).



Fonte: Elaborado pelo próprio

Tabela 14 – Otimização (OTt) total do espaço aéreo conferida pelo modelo estático do Anexo ao Regulamento da ANC n.º 1093/2016

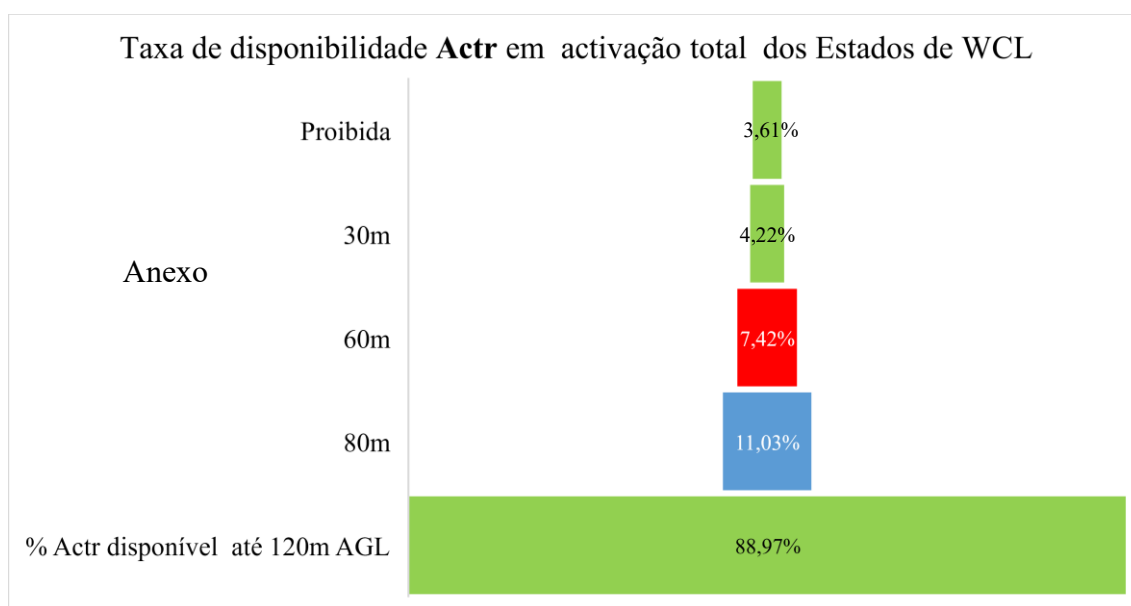
Área total da CTR com restrições abaixo 120m	Regulamento ANAC (Km²)	WCL Estado 2 F5, 1 F10, 2 F10 (Km²)	Otimização (OTt) do modelo dinâmico WCL ativado
Proibida	11,69%	3,61%	8,08%
30m	27,48%	4,22%	23,25%
60m	48,68%	7,42%	41,25%
80m	12,16%	11,03%	1,13%
Área da CTR sem restrição para operar abaixo de 120m	8,08%	88,97%	-80,89%

Fonte: Elaborado pelo próprio

A comparação da área ocupada da zona de controlo é muito inferior no caso da aplicação do método dinâmico comparando com o método estático da literatura (Regulamento da ANAC n.º 1093/2016, Anexo I). Em termos de otimização, o método dinâmico permite libertar 80,89% da área do espaço aéreo cujo o acesso é condicionado pelas zonas geográficas do anexo. O método estático usado para o estudo comparativo é muito mais restritivo (gráfico 5) comparativamente ao método dinâmico de WCL proposto (gráfico 6). As áreas estáticas ocupam substancialmente a zona de controlo pese embora a probabilidade do encontro com uma aeronave tripulada ser nula de acordo com os dados analisados.

Utilizando a área da zona proibida e das zonas de restrição operacional do Anexo, comparando-as com a área ocupada pelo modelo dinâmico ativado de WCL, a otimização do espaço aéreo é melhor em todas as áreas análogas, exceto na área de 80m do Anexo, no qual a diferença para com o modelo dinâmico é de apenas 1,13% (Gráfico 6). No entanto esta área do Anexo está substancialmente afastada em termos geográficos da infraestrutura aeroportuária pelo que é considerada irrelevante.

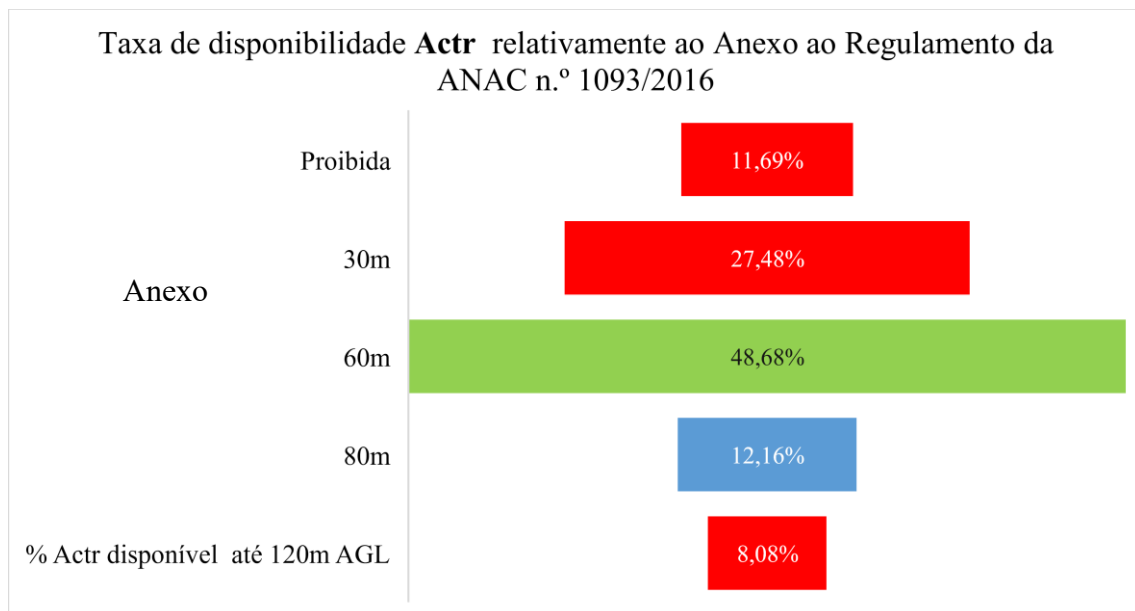
Gráfico 4– Taxa de disponibilidade *Actr* (OT) em ativação total da WCL do Estado 2 F5, Estado 1 F10 e estado 2 F10 (Km²) vs. Áreas de proteção operacional e proibidas do Anexo ao Regulamento da ANAC n.º 1093/2016



Fonte: Elaborado pelo próprio

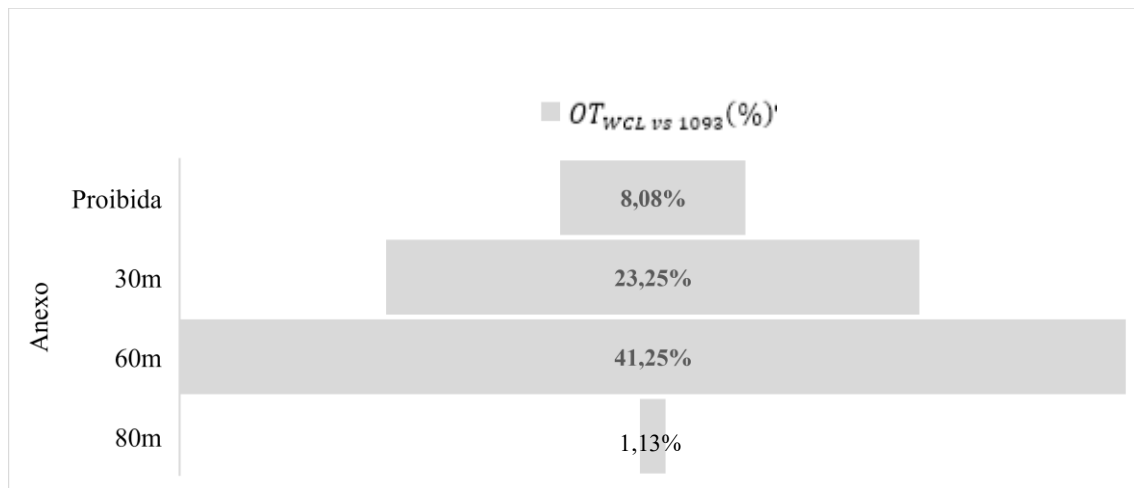
Relativamente às diferenças entre a ocupação da área proibida do Anexo, o método dinâmico de WCL ativado permite disponibilizar 8,08% da área proibida e 23,25% da área 1 de restrição operacional, contribuindo assim para a otimização ativa do espaço aéreo ao mesmo tempo que é garantida a segurança das operações aéreas. Esta otimização é face ao modelo do anexo é ainda maior comparando com a área 2 de restrição operacional.

Gráfico 5– Taxa de disponibilidade da *Actr* (OT) considerando as Áreas de proteção operacional e proibidas do Anexo ao Regulamento da ANAC n.º 1093/2016



Fonte: Elaborado pelo próprio

Gráfico 6 – Otimização $OT_{WCL\ vs\ 1093}(\%)$ obtida entre o método dinâmico de WCL no Estado 2 F5, Estado 1 F10 e estado 2 F10 (Km^2) relativamente às Áreas de proteção operacional e proibidas do Anexo ao Regulamento da ANAC n.º 1093/2016



Fonte: Elaborado pelo próprio

CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES

6.1 – Principais conclusões

As aeronaves não tripuladas trarão benefícios económicos a curto prazo. No entanto estas operações impõem riscos de segurança ('safety'), interferência ilícita ('security'), ambientais, de proteção de dados e de privacidade. Na aviação civil é particularmente importante garantir a segurança das operações no espaço aéreo bem como a eficiência das mesmas, otimizando-as de forma a diminuir os gastos operacionais e o impacto ecológico. Os resultados obtidos permitem concluir que a introdução de modelos WCL dinâmicos não só garantem a segurança das operações, pois baseiam-se no padrão das trajetórias históricas e num pacote de informação diminuto, mas também asseguram a otimização do uso do espaço aéreo e a eficiência das operações. O modelo dinâmico apresentado na CTR de Lisboa poderá trazer os seguintes benefícios:

- Garante que a probabilidade de AEC é quase nulo, aumentando o nível de segurança para as operações de aeronaves tripuladas;
- Os estados dinâmicos permitem que na ausência de tráfego tripulado, as aeronaves tripuladas possam ter acesso a zonas outrora interditas, contribuindo para o desenvolvimento económico e criando novas oportunidades para os operadores cuja a atividade esteja relacionada com o transporte de mercadorias;
- As aeronaves tripuladas podem efetuar rotas mais diretas, otimizando-as de acordo com o estado dinâmico, com vantagens óbvias na autonomia ou na preservação das baterias;
- Os diferentes estados podem ser embutidos no software, não sendo necessário investir ou desenvolver em novos componentes específicos, com desvantagens óbvias em termos de carga útil disponível para o transporte bem como para a autonomia total;
- Ao embutir as áreas dinâmicas no software, a aeronave não tripulada apenas necessita de um pequeno pacote de informação a solicitar a mudança de estado, otimizando-se o gasto de energia total do sistema, através do ganho de energia disponível para a sustentação e navegação;

- A implementação de áreas dinâmicas para assegurar o WCL aumentam a eficiência e disponibilidade do espaço aéreo para as operações de aeronaves não tripuladas, contribuindo para a integração das mesmas, de acordo com o plano Europeu para o U-space.

Tabela 15 – Estado WCL e ação para garantir o RWCL em cada um desses estados dinâmicos ao Regulamento da ANC n.º 1093/2016

WCL dinâmico	Ação RWCL F5	Ação RWCL F10
Estado 0	100% probabilidade de encontro com uma aeronave tripulada na camada entre F5 e F0. a) não podem operar aeronaves não tripuladas no polígono b) as aeronaves tripuladas estão no IAF ou fora da CTA	100% Probabilidade de um Encontro com uma aeronave tripulada na camada entre F10 e F5. a) As aeronaves não tripuladas têm de operar fora do polígono F5 estado 0 até aos limites do polígono F10 no estado 0 até F4 (400'/120m).
Estado 1	a) As aeronaves não tripuladas devem estar fora do polígono; b) A aeronave tripulada está no FAF ou a cruzar F40 (4000') em descida.	WCL - Aeronave tripulada no FAF a) Aeronave não tripulada fora do Polígono F5 no estado 1; b) Altura máxima 30m acima da superfície entre o limite do polígono de F5 no estado 1 e o limite do polígono F10 no estado 0; c) Altura máxima 60m acima da superfície entre o limite do polígono de F10 no estado 0 e o limite do polígono F10 no estado 1;
Estado 2	a) As aeronaves não tripuladas devem estar fora do polígono; b) A aeronave tripulada está no OM	WCL - Aeronave tripulada no OM a) Aeronave fora do polígono F5 Estado 2; b) Altura máxima 30m acima da superfície entre o limite do polígono F5 do Estado 2 e o limite do polígono F10 do Estado 0; c) Altura máxima 60m acima da superfície entre o limite do polígono F10 do Estado 0 e o limite do polígono F10 do Estado 1; b) Altura máxima 60m acima da superfície entre o limite do polígono F10 do Estado 1 e o limite do polígono F10 do Estado 2; d) Fora do F10 estado 2 opera a 120m.

Fonte: Elaborado pelo próprio

Os resultados permitem concluir que é possível introduzir uma dimensão dinâmica materializada nos estados 0, 1 e 2, assegurando sempre uma WCL segura, com benefícios óbvios em relação às áreas estáticas atualmente publicadas (Regulamento 1093/2016, Anexo I). A WCL na final de uma pista dependerá do padrão de tráfego no local, sendo que o método proposto permite identificar esse padrão e ajustar a WCL e a separação entre as operações de acordo com os dados históricos das trajetórias no local.

Os resultados mostram que os estados dinâmicos concetualizados otimizam em 80,89% o acesso das operações de aeronaves não tripuladas na zona de controlo até a uma altura máxima de 400' (120m), permitindo inclusive que as operações possam ocorrer em zonas das áreas proibidas e restritas anteriormente inacessíveis, logo potenciando tanto a exploração económica como a eficiência operacional da navegação. A operação a alturas mais elevadas permitirá o desenvolvimento de determinadas operações em que o voo tem de ser efetuado a uma maior altura acima do solo, nomeadamente as operações de fotogrametria, cartografia, levantamento aéreo e de vigilância.

As tarefas a executar pela aeronave não tripulada e as regras aplicáveis que garantam uma WCL efetiva, necessitam de estar definidas. Para completar um modelo dinâmico é necessário também elaborar o conjunto de ações (tabela 13) a serem implementadas caso a metodologia dinâmica seja utilizada, de forma a testar e assegurar o funcionamento do sistema. A mudança de estado está sempre dependente da informação da posição das aeronaves não tripuladas num determinado local. A análise da bibliografia permite concluir que face à interoperabilidade dos sistemas atuais na aviação, existem pontos específicos em uma aproximação que permitem a existência de tempo suficiente para ser garantida a WCL exigida para cada um dos estados, face ao fluxo de dados disponíveis.

Em termos concetuais, para as aeronaves efetuarem aproximações por instrumentos, a mudança de estado poderá surgir assim que for recebido um pacote de informação de um sistema funcional interoperável relativo à posição de uma aeronave tripulada a partir de um determinado nível de voo em descida ou num fixo de aproximação. A mudança para o segundo estado poderá ser feita exatamente da mesma forma mas a um nível de voo mais baixo ou no fixo seguinte, por exemplo o 'outer marker'. O pacote de informação pode ser disponibilizado por diversas formas, nomeadamente através de

um sistema da própria aeronave tripulada (e.g. ADS-B) do prestador de serviços de navegação aérea (Transponder Modo/S) ou do prestador de serviços UTM.

6.2 – Limitações do estudo

O estudo proposto foi concebido de forma a responder às questões de investigação de base, formuladas com o objetivo de identificar quais as zonas onde realmente as operações de aeronaves não tripuladas a baixa altitude impõem riscos às aeronaves tripuladas a evoluir na zona de controlo de Lisboa. Apesar de o estudo ter sido concluído com razoável sucesso, encontrou-se durante a análise de dados, resultados de posição que não eram os esperados. Os metadados do repositório (EUROCONTROL DDR, 2019), pelas razões já apresentadas na discussão dos resultados, não possui a qualidade exigida para efetuar este tipo de estudo, pese embora tenha sido identificada a causa provável do desvio de **Lat** identificado.

Adicionalmente, o estudo foi limitado pela deteção de um valor de ocorrência de trajetória no lado oposto à final da RWY03, não sendo conclusivo se o repositório DDR armazena as aproximações na RWY21 na RWY03. A complexidade do repositório e a falta de informação de como os dados são gravados e geridos no repositório acabaram por introduzir uma incerteza na WCL identificada no estudo.

Os dados do repositório apenas contêm as trajetórias das aeronaves que efetuam manobras de aterragem e decolagem nas faixas de aterragem do Aeroporto Humberto Delgado (LPPT). O mesmo armazena qualquer trajetória desde que o voo esteja sujeito a medidas de gestão de fluxo e seja proveniente ou esteja a descolar para um aeroporto ou aeródromo existente na base de dados. Os dados referentes às operações de helicópteros nos heliportos existentes dentro da CTR de Lisboa não são armazenados no repositório pois não estão sujeitas a medidas de gestão de fluxo de capacidade, pelo que não é possível aferir qual a trajetória destas aeronaves, se estas aderem à altura de voo publicada para as rotas visuais para helicópteros, nem identificar o local exato onde iniciam a descida abaixo do 1000' ou 300m, para aterrar na infraestrutura aeronáutica. No entanto, é importante referir que não ocorrem operações regulares nestes heliportos,

e provavelmente o número de operações realizadas nessas infraestruturas é extremamente reduzida comparativamente com o número de operações no aeroporto internacional Humberto Delgado. Contudo, as operações de helicópteros na zona de controlo não podem ser desprezadas pois a operação de aeronaves não tripuladas na vizinhança destas infraestruturas podem por em causa a segurança das operações aéreas tripuladas.

6.3 – Perspetivas de investigação futuras

O método dinâmico de garantia de WCL através dos estados concetualizados, apresenta um enorme potencial para ser usado taticamente como um sistema de apoio, de garantia de separação e de replaneamento da navegação de uma aeronave não tripulada a operar em locais de risco no ar muito elevado. Tendo em conta as limitações, seria importante validar o estudo através da realização do mesmo usando elementos de um repositório com dados de trajetórias de maior precisão. Esses dados podem ser obtidos diretamente da base de dados dos sistemas de comunicação, navegação e vigilância geridos pelos prestadores de serviços de navegação aérea. As bases de dados produzidas, possuem informação com taxas de refrescamento inferiores a 5s, garantindo que cada dado de posição na trajetória é gravado a quatro dimensões. Adicionalmente, como são geridos a nível local, as bases de dados incluem informação de todas as aeronaves tripuladas, independentemente do local de partida e de destino, incluindo aquelas não sujeitas à gestão de fluxo e de capacidade. O uso desta informação permitiria estudar também o padrão das trajetórias à volta dos heliportos existentes na zona de controlo ao mesmo tempo que se obteria áreas dinâmicas mais exatas.

Outra corrente de estudo seria a elaboração de um algoritmo relativo à mudança dos estados conceptualizada a fim de ser testado numa aeronave não tripulada. Estes estudos permitiriam validar operacionalmente o modelo e melhorá-lo para responder às exigências de ambientes de grande complexidade de tráfego.

Bibliografia

AIRMAP, (2018). *Five Critical Enablers for Safe, Efficient, and Viable UAS Traffic Management (UTM)*. Disponível em <https://www.airmap.com/downloads/airmap-5-critical-enablers-of-utm-whitepaper-181025.pdf> . Acedido em 19 de maio de 2019.

AIRSPACEMAG. (2019). *A brief History of Unmanned Aircraft*. Disponível em <https://www.airspacemag.com/photos/a-brief-history-of-unmanned-aircraft-174072843/>. Acedido em 19 de maio de 2019.

AVIATION. (2017)). *Is it possible for more than one airplane intercept the ILS at the same time?*. Disponível em <https://aviation.stackexchange.com/questions/22841/is-it-possible-for-more-than-one-airplane-intercept-the-ils-at-the-same-time/22842>. Acedido em 19 de maio de 2019.

Balachandran, S., Narkawicz, A., Muñoz, C., Consiglio, M. (2015). *A path planning Algorithm to enable Well-Clear Low Altitude UAS operation Beyond Visual Line of Sight*. 12º segundo seminário ATM, In Portal Air Traffic Managment Seminar [ATMSeminar], http://atmseminar.org/seminarContent/seminar12/presentations/12th_ATM_RD_Seminar_presentation_16.pdf. Acedido em 19 de setembro de 2004.

Chen Y., Baek D., Bocca A., Macii A., Macii E., Poncino M. (2018). *A case for a Battery-Aware Model of Drone Energy Consumption*. Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE], International Telecommunications Energy Conference [INTELEC]. Retirado: novembro, 15, 2018, de <https://ieeexplore.ieee.org/document/8612333> .

European Aviation Safety Agency [EASA]. (2016). *Drone Collision Task Force*. Disponível em https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/TF%20Drone%20Collision_Report%20for%20Publication%20%28005%29.pdf . Acedido em 6 de junho de 2019.

European Aviation Safety Agency [EASA]. (2018). *New Regulatory Framework for UAS*. Apresentado no Spectrum for Drones/UAS. Copenhaga, In portal do CEPT,

<https://cept.org/files/20153/Keynote%20%20EASA%20Presentation%20for%20CEPT%20workshop%20on%20Drones.pdf> . Acedido em 19 de setembro de 2018.

École Nationale de l'Aviation Civile [ENAC]. (2016) https://rpaschair.enac.fr/wp-content/uploads/2017/03/c2_link_frequencies.pdf . Acedido a 19 de setembro, 2018 de ENAC em <http://drone-chair.enac.fr/rpas-chair/uas-frequencies-report/>.

EUROCONTROL *Network Strategic Modeling Tool [EUROCONTROL NEST]*. (2018). <https://www.eurocontrol.int/model/network-strategic-modelling-tool>. Acedido a 01 de junho, 2018 de <https://www.eurocontrol.int>.

EUROCONTROL *Demand Data Repository Web Portal [EUROCONTROL DDR]*. (2018). <https://www.eurocontrol.int/ddr#access-conditions>. Acedido a 01 de junho, 2018 de <https://www.eurocontrol.int>.

European Organisation for Civil Aviation Electronics [EUROCAE]. (2019a). <https://eurocae.net/about-us/working-groups/> Acedido a 19 de maio, 2019 de EUROCAE em www.eurocae.com.

European Organisation for Civil Aviation Electronics [EUROCAE]. (2019b). *ED-258 OSED for Detect & Avoid [Traffic] in Class D-G airspaces under VFR/IFR*. Disponível em : <https://eurocae.net/about-us/working-groups/>. Acedido a 19 de maio, 2019.

Electronic Aeronautical Information Publication [eAIP] (2019). Publicação eletrónica de informação aeronáutica nacional. Acedido em 30 de novembro de 2019, em <https://www.nav.pt/ais/eaip>.

International Civil Aviation Organization [ICAO]. (2005). *Doc. 9854 AN/458 Global Air Traffic Management Operational Concept*. (1st edition). Montréal, Quebec, Canada: ICAO.

International Civil Aviation Organization [ICAO]. (2006a). *Annex 10 - Aeronautical Telecommunications Volume I, Radio Navigation Aids*. (6th edition). Montréal, Quebec, Canada: ICAO.

International Civil Aviation Organization [ICAO]. (2006b). *Doc. 8168 OPS/611 Aircraft Operations* , Volume I, Flight Procedures. (5th edition). Montreal, Québec, Canada: ICAO.

International Civil Aviation Organization [ICAO]. (2006c). *Doc. 9863 AN/461 Airborne Collision Avoidance System (ACAS) Manual*. First Edition. Montréal, Quebec, Canada.

International Civil Aviation Organization [ICAO]. (2007). *Doc. 4444 ATM/051 Air Traffic Managment*. (15th edition). Montréal, Quebec, Canada: ICAO.

International Civil Aviation Organization [ICAO]. (2011). *Cir. 328 AN/190 Unmanned Aircraft Systems (UAS)*. (1st Edition). Montréal, Quebec, Canada. ISBN 978-92-9231-751-5.

International Civil Aviation Organization [ICAO]. (2015). *Doc. 10019 AN/507 Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS)*. (1st Edition). Montréal, Quebec, Canada: ICAO.

International Civil Aviation Organization [ICAO]. (2017). *Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) Concept of Operations (CONOPS) for International IFR Operations*. Disponível em [https://www.icao.int/safety/UA/Documents /RPAS% 20 CONOPS.pdf](https://www.icao.int/safety/UA/Documents/RPAS%20CONOPS.pdf). Acedido em 19 de maio de 2019.

International Civil Aviation Organization [ICAO]. (2018). *Annex 15 - Aeronautical Information Services*. (Sixteenth Edition). Montréal, Quebec, Canada: ICAO.

Jamoom, M. B. Joerger, M. Pervan, B. (2015). *Unmanned Aircraft System Sense and Avoid Integrity and Continuity Risk for Non-Cooperative Intruders*. Aerospace American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA SciTech, 2015-0484.

Joint Aviation for Rulemaking of Unmanned Systems [JARUS]. (2015). WG6 & EUROCAE WG73 Airworthiness Conciliation team report *JAR doc 04 JARUS AMC RPAS.1309* (Issue 2). Disponível em http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_04_doc_3_jarus_wg6_eurocae_wg73_conciliation_team_report_0.pdf Acedido em 19 de maio de 2019.

Joint Aviation for Rulemaking of Unmanned Systems [JARUS]. (2019). *Guidelines on SORA Annex D Tactical Mitigation Collision Risk Assessment*. Disponível em http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_doc_06_jarus_sora_annex_d_v1.0.pdf. Acedido em 19 de maio de 2019.

Joint Aviation for Rulemaking of Unmanned Systems. (2019). JARUS *Guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA)*. Disponível em <http://jarus-rpas.org/publications> . Acedido em 19 de maio de 2019.

Kochenderfer, M. J. Espindle, L. P. Edwards, M. W. M. Kuchar, J.K. Griffith, J. D. (2009). *Airspace Encounter Models for Conventional and Unconventional Aircraft*. Presented in the Eighth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2009). Napa, California, United States of America.

Kochenderfer, M. J. Chryssanthacopoulos, J. P. Weibel, R. E. (2011). *A New Approach for Designing Safer Collision Avoidance System*. Presented in the Ninth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2011). Berlin, Germany.

Larrow, J. Johnson, M. (2016). *NASA UTM Project 2016 Annex H – SORA & UTM*. NASA Ames Research Center. Moffett Field, California, United States.

Lee, H. T., Meyn, L. A., Kim, S. Y., (2013). *Probabilistic Safety Assessment of Unmanned Aerial System Operations. Journal of Guidance, control and dynamics*. Vol. 36, No 2, Março-Abril 2013, DOI: 10.2514/1.57572.

Lester, E., Weinert, E. *Three quantitative means to remain well clear for small UAS in the terminal area*. Integrated Communications Navigation and Surveillance [ICNS] Conference. Disponibilizado pelo autor via email: dezembro, 15, 2019, April 9-11.

McClelland, H. G. Kang, C. K. Woolsey, C. A. Roberts, A. K. Buck, D. Cheney T., et al., (2017). *Small Aircraft Flight Encounters Database for UAS Sense and Avoid*. AIAA Information Systems SciTech Forum, Grapevine, Texas. AIAA 2017-1152.

Mueller, E. (2017). *Enabling Airspace Integration for High Density Urban Air Mobility*. Nasa Technical Reports Server, Uber Elevate Summit, Dallas, Texas, United States.

Narkawicz, A. Consiglio, M. M. (2017). *A Path Planning Algorithm to Enable Well-Clear Low Altitude UAS Operation Beyond Visual Line of Sight*. Presented in the Twelfth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2017). Seattle, Washington, United States of America.

Perez-Batlle, M. Pastor, E. Prats, X. Royo, P. Cuadrado, R. (2013). *Maintaining separation between airliners and RPAS in non-segregated airspace*. ATM seminar, ICARUS Research Group, 10.13140/2.1.2688.8320.

Pellebergs, J. (2017). *Saab Aeronautics Collision Avoidance for RPAS*. ICAS workshop. Disponível em http://www.icas.org/media/pdf/Workshops/2017/16_pellebergs/DAA%20Collision%20Avoid%20ancw.pdf. Acedido em 19 de maio de 2019.

Prandini, M. Hu, J. Lygeros, J. Sastry, S. (2019). *A Probabilistic Approach to Aircraft Conflict Detection*. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/264319668_Maintaining_separation_between_airliners_and_RPAS_in_non-segregated_airspace. Acedido em 19 de maio de 2019.

Radio Technical Commission for Aeronautics [RTCA]. (2017). *List of Available Documents*. Disponível em: <https://www.docdroid.net/v3C40Ce/list-of-available-docs-september-2019.pdf#page=37>. Acedido em 30 de setembro de 2019.

Regulamento (CE) 552/2004, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 10 de março de 2004. "OJ L". 96. (31.3.2004), 26–41.

Regulamento de Execução (UE) 923/2012, de 26 de setembro de 2012. "OJ L". 281. (13.10.2012), 1-66.

Regulamento da ANAC n.º 1093/2016, de 14 de dezembro de 2016. Condições de operação aplicáveis à utilização do espaço aéreo pelos sistemas de aeronaves civis pilotadas remotamente ("Drones"). Diário da República n.º 238/2016, Série II de 2016-12-14, 36613-36622.

Regulamento (UE) 2018/1139, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de julho de 2018. “OJ L”. 212. (22.8.2018), 1–122.

Regulamento de Execução (UE) 2019/947, da Comissão, de 24 de maio de 2019. “OJ L”.152. (11.06.2019), 45-71.

Regulamento Delegado (UE) 2019/945, da Comissão, de 12 de março de 2019. “OJ L”.152. (11.06.2019), 1-40.

Santiago, C. Mueller, E. R. (2015). *Pilot Evaluation of a UAS Detect-and-Avoid System's Effectiveness in Remaining Well Clear*. Presented in the Eleventh USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2015). Lisboa, Portugal.

Skylibrary. (2016). Information processing [texto colocado na página eletrónica www.skylibrary.com] enviado para https://www.skybrary.aero/index.php/Information_Processing . Acedido em 30 de setembro de 2019.

Single European Sky ATM Research [SESAR]. (2016). *Joint Undertaking 2016 European Drones Outlook Study - Unlocking the value for Europe 2017*. Disponível em https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/European_Drones_Outlook_Study_2016.pdf. Acedido em 19 de maio de 2019.

Single European Sky ATM Research [SESAR]. (2017). *European ATM Master Plan*. Disponível em <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/European%20ATM%20Master%20Plan%20Drone%20roadmap.pdf>. Acedido em 19 de maio de 2019.

Single European Sky ATM Research [SESAR]. (2017). *Joint Undertaking U-space Blueprint*. Disponível em <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/European%20ATM%20Master%20Plan%20Drone%20roadmap.pdf>. Acedido em 19 de maio de 2019.

Tesla N. (1898). *Method of and Apparatus for controlling mechanism of moving vessels or vehicles*. US patent office, No. 613,806, Patented 8 November 1898.

Disponível em <https://patents.google.com/patent/US613809> . Acedido em 6 de junho de 2019.

Thipphavong, D. Seungman, A. C. (2017). *Ensuring Interoperability between UAS Detect-and Avoid and Manned Aircraft Collision Avoidance*. Presented in the Twelfth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2017). Seattle, Washington, United States of America.

Upchurch, J. M. Munoz, C. M. Narkawicz, A. J. Consiglio, M. C. Chamberlain, J. P. (2015). *Characterizing the Effects of a Vertical Time Threshold for a Class of Well-Clear Definitions*. Presented in the Eleventh USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2015). Lisboa, Portugal.

Washington Post. (2013). *As drone evolve from Military to Civilian uses venture capitalists moves in*. Disponível em https://www.washingtonpost.com/business/as-drones-evolve-from-military-to-civilian-uses-venture-capitalists-move-in/2013/10/31/592ca862-419e-11e3-8b74-d89d714ca4dd_story.html?noredirect=on&utm_term=.d4455c388fb5. Acedido em 6 de junho de 2019.