

Aplicabilidade dos "UAV" na Rede Nacional de Transporte

JOSÉ PEDRO COELHO LOURENÇO

Julho de 2020

APLICABILIDADE DOS “UAV” NA REDE NACIONAL DE TRANSPORTE

José Pedro Coelho Lourenço



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2020

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE -
Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: José Pedro Coelho Lourenço, Nº 1151353, 1151353@isep.ipp.pt

Orientação do ISEP: Tiago Branco Andrade, tba@isep.ipp.pt

Organização: REN – Redes Energéticas Nacionais

Orientação da Organização: José da Costa Moreira, jose.moreira@ren.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2020

Agradecimentos

Agradeço ao Engenheiro José da Costa Moreira, por visionar uma oportunidade de inovação e conceder-me o apoio para a concretização deste resultado. Espero que o conhecimento acumulado deste tema complemente todos os conhecimentos profissionais, de engenharia e gestão que me transmitiu. A todo o Complexo da REN em Vermoim, que me integrou e se disponibilizou sempre para me proporcionar as melhores condições de trabalho.

Como tal ao Professor Doutor Tiago Andrade que desde o início demonstrou calma e apoio, cuja orientação guiou para a melhor estruturação do raciocínio. De igual forma ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, colegas e docentes, cuja disciplina e educação prepara para um melhor ambiente e profissionalismo.

Por fim, a todos aqueles mais chegados, que me acompanharam e levantaram durante todo este percurso. Com isto, um especial obrigado à minha mãe.

Resumo

As infraestruturas de qualquer serviço ou indústria devem ser alvo de inspeções cujo objetivo é monitorizar o estado dos equipamentos e garantir o bom funcionamento de exploração, economizando a manutenção ativa desses equipamentos.

Especialmente no transporte de energia de muito alta tensão, cujas infraestruturas estendem-se por longos corredores de linhas elétricas em locais remotos e constantemente sujeitas a condições atmosféricas, entre outros fenómenos. Por isso, a REN integra toda uma gestão no âmbito das inspeções. A metodologia desta gestão recorre a serviços de helicópteros que permitem realizar o levantamento aéreo das longas faixas de linhas. Este levantamento consiste na inspeção visual, termográfica e laser, cujos dados são essenciais na monitorização do estado dos ativos.

No âmbito das inspeções, neste trabalho é estudado o desempenho de uma ferramenta recentemente considerada para fins profissionais, os UAV. Estes são veículos aéreos remotamente pilotados e por isso possuem diversas tecnologias que habilitam a navegação e o controlo da aeronave, como sistemas anti colisão e de posicionamento muito precisos. Estas tecnologias permitem voos estabilizados que apresentam riscos reduzidos a pessoas e propriedades. No entanto, as operações com UAV são ainda muito regularizadas, nomeadamente em operações onde o UAV se encontra fora da linha de vista, apesar destas tecnologias mencionadas habilitarem a operações capazes e seguras.

Os UAV enquadram-se no contexto das inspeções pois, quando acoplados com a devida instrumentação, realizam o mesmo levantamento dos helicópteros. Porém, para isto se verificar são necessárias duas soluções de UAV: asa rotativa e asa fixa.

Com isto, cada solução poderá enquadrar certos aspetos das metodologias de inspeção. A solução de asa rotativa, pela sua estabilidade de voo, é indicada para inspeções visuais ou termográficas pormenorizadas e a de asa fixa para o mapeamento laser na criação de uma cópia digital dos troços percorridos. Os custos operacionais dos UAV são reduzidos, embora se verifique que as inspeções com recurso a estas ferramentas são penalizadas

devido à deslocação terrestre associada às mesmas, que por outro lado não se observa nos helicópteros em longos cenários como as linhas elétricas da REN.

Por estes motivos, os UAV ainda não são uma ferramenta capaz de substituir os helicópteros na inspeção total da rede. No entanto, como referido, estes enquadram outros cenários, como cenários de emergência/pontuais onde se pretende um levantamento detalhado da situação ou na gestão da vegetação que se encontra sob as linhas através do mapeamento da solução de asa fixa. Estes cenários não estão tão dependentes da deslocação terrestre e por sua vez, a análise financeira destes casos é positiva.

Assim, em cenários mais curtos, onde a deslocação terrestre tem um peso menor, os UAV complementam qualquer função com custos operacionais reduzidos como inspeções em subestações ou rondas apeadas pelas linhas elétricas.

Palavras-Chave

UAV, Drone, RNT, REN, Linhas de Muito Alta Tensão, Subestações, Inspeção Aérea, Estado da Arte, Análise Custo-Benefício

Abstract

The infrastructures of any service or industry must be subject to inspections whose objective is to monitor the condition of the equipment and ensure the proper operation of exploration, saving the active maintenance of these equipment.

Especially in the transmission of very high voltage energy, whose infrastructure extends over long corridors of power lines in remote locations and are constantly subject to atmospheric conditions, among other phenomena. For this reason, REN integrates a management within the scope of inspections. The methodology of this management resort to helicopter services that allow the aerial survey of long lines. This survey consists of visual, thermographic and laser inspection, whose data are essential for monitoring the status of assets.

In the scope of inspections, this work studies the performance of a tool recently considered for professional purposes, the drones. These are remotely piloted aerial vehicles and therefore have several technologies that enable navigation and control of the aircraft, such as highly accurate anti-collision and positioning systems. These technologies allow stabilized flights that present reduced risks to people and property. However, UAV operations are still highly regularized, namely in operations where UAV is out of line of sight, despite the aforementioned technologies enabling capable and safe operations.

The UAVs fit into the context of inspections because, when coupled with the proper instrumentation, they perform the same survey as helicopters. However, for this to occur, two UAV solutions are required: rotary wing and fixed wing.

With this, each solution will be able to fit certain aspects of the inspection methodologies. The rotary wing solution, due to its flight stability, is indicated for detailed visual or thermographic inspections and the fixed wing for laser mapping in the creation of a digital copy of the sections covered. The operational costs of the UAV are reduced, although it appears that inspections using these tools are penalized due to the ground travel associated

with them, which on the other hand is not observed in helicopters in long scenarios such as REN's power lines.

For these reasons, drones are not yet a tool capable of replacing helicopters in full inspection of the grid. However, as mentioned, these fit other scenarios, such as emergency / one-off scenarios where a detailed survey of the situation or the management of the vegetation that is found under the lines through the mapping of the fixed wing solution is intended. These scenarios are not as dependent on land displacement and, in turn, the financial analysis of these cases is positive.

Thus, in shorter scenarios, where land travel has less weight, drones complement any function with reduced operating costs such as inspections at substations or rounds cut by power lines.

Keywords

UAV , Drone, RNT, REN, Overhead Powerlines, Substation, Aerial Inspection, State of the Art, Cost-Benefit Analysis

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	VII
ÍNDICE	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABELAS	XV
ACRÓNIMOS	XVII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2.OBJETIVOS	4
1.3.ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	4
1.4.CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	5
2. REDE NACIONAL DE TRANSPORTE	7
2.1.LINHAS AÉREAS EM MUITO ALTA TENSÃO.....	7
2.1.1. Apoios.....	9
2.1.2. Cabos	11
2.1.3. Cadeias de Isoladores	13
2.1.4. Acessórios	14
2.2.SUBESTAÇÕES.....	21
2.2.1. Painel e Equipamentos.....	21
2.3.ATUAIS METODOLOGIAS DE INSPEÇÃO	26
2.3.1. Inspeções Visuais Terrestres	29
2.3.2. Inspeções Aéreas	30
2.4.CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	32
3. ESTADO DA ARTE DOS UNMANNED AERIAL VEHICLES	33
3.1.REGULAMENTAÇÃO	34
3.2.DRONES PROFISSIONAIS.....	38
3.2.1. Asa Fixa	39
3.2.2. Asa Rotativa	41
3.3.SISTEMAS DE CONTROLO DE AVIAÇÃO - AVIONICS	42

3.3.1.	<i>Sistemas de Navegação</i>	43
3.3.2.	<i>Sistemas de Controlo</i>	47
3.4.	INSTRUMENTAÇÃO	51
3.4.1.	<i>Fotogrametria e Inspeção de Pormenor</i>	52
3.4.2.	<i>LiDAR</i>	54
3.4.3.	<i>Termografia</i>	56
3.4.4.	<i>Ultravioleta</i>	59
3.5.	SOFTWARES PROCESSAMENTO DE IMAGEM	61
3.5.1.	<i>Procedimento de Processamento</i>	62
3.5.2.	<i>Outputs</i>	64
3.5.3.	<i>Machine Learning</i>	68
3.6.	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	73
4.	ANÁLISE DA APLICABILIDADE	75
4.1.	ANÁLISE DA APLICABILIDADE.....	76
4.1.1.	<i>Barreiras</i>	79
4.1.2.	<i>Beyond Visual Line of sight (BVLOS)</i>	82
4.1.3.	<i>Gestão de Frota</i>	88
4.1.4.	<i>Casos REN</i>	92
4.1.5.	<i>Casos em Congéneres Internacionais</i>	101
4.1.6.	<i>Projetos</i>	103
4.1.7.	<i>Outras Funções Disponíveis</i>	105
4.2.	ANÁLISE QUANTITATIVA.....	108
4.2.1.	<i>Cenários</i>	112
4.3.	ANÁLISE QUALITATIVA	117
4.3.1.	<i>Análise Sucinta</i>	125
4.4.	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	129
5.	CONCLUSÕES	131
5.1.	CONCLUSÃO	131
5.2.	TRABALHOS FUTUROS	133
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135

Índice de Figuras

FIGURA 1 – GARTNER HYPE CYCLE DE TECNOLOGIAS EMERGENTES EM 2019 [1].....	3
FIGURA 2 – MAPA DA REDE NACIONAL DE TRANSPORTE (RNT) [4].....	8
FIGURA 3 – APOIO SIMPLES DE AMARRAÇÃO; APOIO TRIPLO DE SUSPENSÃO [6]	10
FIGURA 4 – FUNDAÇÃO DE UM APOIO [5].....	11
FIGURA 5 – CABOS CONDUTORES UTILIZADOS NA RNT [6].....	12
FIGURA 6 – CABO DE GUARDA OPGW [6].....	13
FIGURA 7 A) ISOLADOR DE VIDRO B) ISOLADOR DE CERÂMICA C) ISOLADOR COMPÓSITO [5]	13
FIGURA 8 – PINÇA DE SUSPENSÃO [5].....	15
FIGURA 9 – PINÇA DE AMARRAÇÃO [5]	15
FIGURA 10 – GEOMETRIA DOS VÃOS DE LINHAS ELÉTRICAS (FONTE PRÓPRIA)	16
FIGURA 11 – AMORTECEDOR [6]	16
FIGURA 12 – SEPARADOR DE FEIXE COM CAPACIDADES AMORTECEDORAS [6].....	17
FIGURA 13 – SINALÉTICAS OBRIGATÓRIAS NOS APOIOS DA RNT [6].....	18
FIGURA 14 – BALIZAGEM DIURNA ESPAÇADA E ALTERNADA NOS CABOS DE GUARDA [6]	18
FIGURA 15 – BIRD FLY DIVERTER (BFD) [6]	19
FIGURA 16 – NIDIFICAÇÃO DA CEGONHA NOS APOIOS DA RNT DESLOCADA PARA UMA PLATAFORMA DE NIDIFICAÇÃO [6]	20
FIGURA 17 – INIBIDORES DE POUSO [6].....	20
FIGURA 18 – PAINEL DE UMA SUBESTAÇÃO E EQUIPAMENTOS QUE O COMPREENDEM [14]	22
FIGURA 19 – DISJUNTOR – COMANDO DE CONTROLO E CONTACTOS DE ATUAÇÃO [14].....	23
FIGURA 20 – SECCIONADOR DO BARRAMENTO [14]	24
FIGURA 21 – TRANSFORMADOR DE CORRENTE (ESQUERDA) E TRANSFORMADOR DE TENSÃO (DIREITA) [14].....	25
FIGURA 22 – GESTÃO DA VEGETAÇÃO SOB A FAIXA DE SERVIDÃO DAS LINHAS ELÉTRICAS [20]	27
FIGURA 23 – POLUIÇÃO VISÍVEL NOS ISOLADORES DE VIDRO (FONTE: REN)	28
FIGURA 24 – NIDIFICAÇÃO DA CEGONHA SOBRE OS APOIOS DA RNT (FONTE: REN)	28
FIGURA 25 – EXEMPLO DE DEFEITOS DETETADOS NUMA RONDA TERRESTRE: ISOLADORES DE VIDRO PARTIDOS E ESFERAS DE BALIZAGEM QUEIMADAS (FONTE PRÓPRIA)	29
FIGURA 26 – INSTRUMENTAÇÃO LiDAR ACOPLADA AO HELICÓPTERO (FONTE: REN)	31
FIGURA 27 – EXEMPLO DO LEVANTAMENTO AÉREO VISUAL DE UM HELICÓPTERO (FONTE: REN)	31
FIGURA 28 – ZONAS DE TRÁFEGO DE AERÓDROMO: A) B) C) D). ALTURAS MÁXIMAS REPRESENTADAS: VERDE – 80M; AMARELO – 60M; LARANJA – 30M; VERMELHO – ÁREA PROIBIDA [24].....	36
FIGURA 29 – RESULTADO DE UMA INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA NUM PARQUE FOTOVOLTAICO [30]	38
FIGURA 31 – TESTES DE PRECISÃO DE ATERRAGEM AUTOMÁTICA DENTRO DE UM RAIO DE 5 METROS [32]	40
FIGURA 32 – DJI M210 RTK: UAV DE ASA ROTATIVA (FONTE PRÓPRIA).....	41
FIGURA 33 – CORREÇÃO POSICIONAL ATRAVÉS DO INS [41]	43
FIGURA 34 – COMPARAÇÃO DA PRECISÃO POSICIONAL ENTRE GPS E SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO INTEGRADOS [42]	44
FIGURA 35 – SISTEMA RTK, DESENVOLVIDO PELA DJI PARA O MODELO MATRICE 200 (FONTE PRÓPRIA).....	45
FIGURA 36 – COMPARAÇÃO ENTRE O SISTEMA DE CORREÇÃO RTK (ESQUERDA) E PPK (DIREITA) [44]	46
FIGURA 37 – PRECISÃO POSICIONAL DO SISTEMA RTK [47].....	47
FIGURA 38 – INTERFACE DE UM GCS – ALERTAS DE INTERFERÊNCIAS [38].....	48
FIGURA 39 – DISTRIBUIÇÃO DOS SENSORES ANTI COLISÃO [36]	49
FIGURA 40 - PROCESSAMENTO FOTOGRAMÉTRICO (FONTE: REN).....	52
FIGURA 41 – DJI ZENMUSE X7 (ESQUERDA); DJI ZENMUSE Z30 (DIREITA) [56], [57]	53
FIGURA 42 – CAPACIDADE DE ZOOM DO SENSOR ZENMUSE Z30 [57]	54
FIGURA 43 – EXEMPLO DE LEVANTAMENTO LiDAR PROCESSADO [54]	54
FIGURA 44 – RIEGL VUX-240 (ESQUERDA); RIEGL MINIVUX-1UAV (DIREITA) [59], [60]	55

FIGURA 45 – RESULTADO DA CLASSIFICAÇÃO DOS PONTOS APÓS O PROCESSAMENTO LiDAR [61].....	56
FIGURA 46 – RESULTADO TERMOGRÁFICO (ESQUERDA) E VISUAL (DIREITA) DA INSPEÇÃO DE UM MESMO APOIO (FONTE: REN)	57
FIGURA 47 – DJI ZENMUSE XT E XT2 [62], [63]	58
FIGURA 48 – ZENMUSE H20T – SOLUÇÃO COM QUATRO TECNOLOGIAS DE SENSORES [64]	59
FIGURA 49 – DANOS PROVOCADOS EM ISOLADORES COMPÓSITOS PELO EFEITO COROA [66]	59
FIGURA 50 – PONTO QUENTE DETETADO (EM CIMA) E CONFIRMAÇÃO DO DEFEITO RECORRENDO A UM UAV [66].....	60
FIGURA 51 – PROCEDIMENTO GENÉRICO DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM [67]	62
FIGURA 52 – PROCEDIMENTO DE TRIANGULAÇÃO NA DEFINIÇÃO DA NUVEM DE PONTOS [69].....	64
FIGURA 53 – POINT CLOUD (ESQUERDA) E 3D MESH (DIREITA) [69]	65
FIGURA 54 – ORTO MOSAICO [69].....	65
FIGURA 55 – DIGITAL SURFACE MODEL (DSM) [69].....	66
FIGURA 56 – POST-PROCESSING DO SOFTWARE LiDAR360 E RELATÓRIO DE DISTÂNCIAS CRÍTICAS [61].....	70
FIGURA 57 – DELAIR AFTER FLIGHT (SOFTWARE DE PRÉ-PROCESSAMENTO) [77]	71
FIGURA 58 – DELAIR.AI (SOFTWARE DE PÓS-PROCESSAMENTO) [78].....	72
FIGURA 59 – EXEMPLO DE CORREDORES EM LOCAIS REMOTOS E ONDE SÃO VISÍVEIS VÁRIOS APOIOS, AINDA QUE DISTANTES (FONTE PRÓPRIA)	79
FIGURA 60 – RESISTÊNCIA E ESTABILIDADE DO DJI M210 EM CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS ADVERSAS [82].....	82
FIGURA 61 – ASPETOS DE CERTIFICAÇÃO BVLOS [84]	83
FIGURA 62 – PRINCÍPIO DA TÉCNICA “SENSE-AND-AVOID” [87].....	85
FIGURA 63 – MANOBRAS DE EVASÃO DESENCADEADAS NA PROXIMIDADE DE PERIGOS [87]	86
FIGURA 64 – LIMITAÇÃO DA ÁREA DE OPERAÇÃO DO UAV (GEOFENCE) [87].....	87
FIGURA 65 – TROÇO DA LINHA RECAREI-PARAIMO EXEMPLIFICANDO UM PONTO ESTRATÉGICO NO APOIO 43 (FONTE: PRÓPRIA, GOOGLE MAPS E GEOREN)	91
FIGURA 66 – UAV RECORRIDO NA DEMONSTRAÇÃO DE PORMENOR (DJI MATRICE 600) (FONTE: REN).....	93
FIGURA 67 – PORMENORES DETETADOS NA DEMONSTRAÇÃO DE INSPEÇÃO DE PORMENOR (FONTE: REN).....	94
FIGURA 68 – DEFEITOS DETETADOS EM ISOLADORES, NOMEADAMENTE PONTOS BRANCOS, ISOLADORES COMPÓSITOS DEFORMADOS E SUJIDADE EM ISOLADORES DE VIDRO (FONTE: REN).....	95
FIGURA 69 – QUALIDADE DA IMAGEM RECOLHIDA EM CONTRALUZ (FONTE: REN)	96
FIGURA 70 – DEMONSTRAÇÃO TERMOGRÁFICA NUMA UNIÃO E RESPECTIVA TEMPERATURA (FONTE: REN)	97
FIGURA 71 – DEMONSTRAÇÃO DE ASA FIXA NA IDENTIFICAÇÃO DA NIDIFICAÇÃO DE CEGONHAS (FONTE: REN)	98
FIGURA 72 – PROCESSAMENTO FOTOGRAMÉTRICO DO LEVANTAMENTO REPRESENTADO NA FIGURA 71 (FONTE: REN)	98
FIGURA 73 – PORMENORES DE UMA INSPEÇÃO DE CORROSÃO (FONTE: REN).....	99
FIGURA 74 – AMOSTRA DOS RESULTADOS DA INSPEÇÃO DE CORROSÃO (FONTE: REN).....	99
FIGURA 75 – RESULTADOS DA INSPEÇÃO A ISOLADORES COMPÓSITOS (FONTE: REN).....	100
FIGURA 76 – RTE E DELAIR: MAPEAMENTO LiDAR RECORRENDO AO DT26 [91]	102
FIGURA 77 – RESULTADO DA DEMONSTRAÇÃO DA DELAIR PERANTE A ENEDIS (FRANÇA) [90]	102
FIGURA 78 – DEMONSTRAÇÃO DE MAPEAMENTO DA DELAIR NA ISLÂNDIA [92]	103
FIGURA 79 – SISTEMA INTEGRADO DE VIGILÂNCIA E BASE PARA UAV (FONTE: REN)	104
FIGURA 80 – COLOCAÇÃO DE GUIAS PARA TRAÇÃO DE CABOS CONDUTORES RECORRENDO A DRONES [94], [95].....	105
FIGURA 81 – MECANISMO E PROCESSO DE COLOCAÇÃO DE BFD [96].....	106
FIGURA 82 – LIMPEZA DE PLÁSTICOS ATRAVÉS DE UM LANÇA-CHAMAS COM RECURSO A UAV [97]	107
FIGURA 83 – LIMPEZA DE INFRAESTRUTURAS COM RECURSO A UAV [98]	107
FIGURA 84 – RISCOS HUMANOS E INFRAESTRUTURAIS DOS TRABALHOS DAS METODOLOGIAS TRADICIONAIS [96].....	108
FIGURA 85 – DESAGREGAÇÃO DOS CUSTOS DAS OPERAÇÕES COM UAV	112
FIGURA 86 – DESEMPENHO DAS DIFERENTES ESTIMATIVAS E ORÇAMENTOS.....	117
FIGURA 87 – ESPECTRO DOS CUSTOS ESTIMADOS PARA AS OPERAÇÕES COM UAV EM CENÁRIOS DISTINTOS	118
FIGURA 88 – CUSTOS ADICIONAIS NA CRIAÇÃO DE UM SERVIÇO INTERNO COM UAV	119
FIGURA 89 – EQUIVALÊNCIA DOS CUSTOS DOS UAV FACE À TOTALIDADE DOS SERVIÇOS DOS HELICÓPTEROS NUM CENÁRIO DE 7400 KM.....	125

Índice de Tabelas

TABELA 1 – COMPRIMENTO DAS LINHAS ELÉTRICAS AÉREAS DA RNT [4].....	9
TABELA 2 – UAV ASA FIXA E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS [33]–[35].....	40
TABELA 3 – UAV ASA ROTATIVA E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS [36], [38]	42
TABELA 4 – PRECISÃO POSICIONAL DO SISTEMA RTK [47]	47
TABELA 5 - DISTÂNCIA ENTRE PONTOS (QUALIDADE DE PROCESSAMENTO) POR SOFTWARE [70]	66
TABELA 6 – QUANTIDADE DE PONTOS GERADOS POR SOFTWARE [70]	67
TABELA 7 – PRECISÃO DE PROCESSAMENTO POR SOFTWARE [71]	67
TABELA 8 – DISCREPÂNCIA DE PRECISÃO E CLASSE DE PROCESSAMENTO DO PIX4D [72].....	67
TABELA 9 – COMPARAÇÃO GENÉRICA DO CUSTO, TEMPO E EQUIPA DAS METODOLOGIAS [80].....	77
TABELA 10 – DIFERENÇA DOS CUSTOS ENVOLVIDOS NAS METODOLOGIAS [80]	78
TABELA 11 – CARACTERÍSTICAS DA METODOLOGIA DOS HELICÓPTEROS [99]	109
TABELA 12 – CARACTERÍSTICA DA METODOLOGIA DOS UAV DE ASA ROTATIVA.....	110
TABELA 13 – CARACTERÍSTICA DA METODOLOGIA DOS UAV DE ASA FIXA	111
TABELA 14 – RESULTADOS CENÁRIO 1 (7400 KM).....	113
TABELA 15 – RESULTADOS CENÁRIO 2 (50 KM).....	114
TABELA 16 – ORÇAMENTOS PROPOSTOS PELOS SERVIÇOS DE UAV	115
TABELA 17 – RESULTADOS CENÁRIO 3 (1400 KM).....	116
TABELA 18 – RESUMO DOS RESULTADOS DOS DIFERENTES CENÁRIOS (EM €)	117
TABELA 19 – DISPONIBILIDADE DO MERCADO PARA A TOTALIDADE DA REDE.....	119
TABELA 20 – DISPONIBILIDADE DO MERCADO NUM CENÁRIO DE EMERGÊNCIA.....	121
TABELA 21 – ANÁLISE FINANCEIRA DO UAV ROTATIVA PARA FINS DE EMERGÊNCIA (310 KM).....	122
TABELA 22 – COMPLEMENTO DA SOLUÇÃO DE ASA FIXA NA GESTÃO DE RISCO DA VEGETAÇÃO.....	123
TABELA 23 – ANÁLISE FINANCEIRA DO UAV FIXA PARA FINS DA GESTÃO DA VEGETAÇÃO (7400 KM).....	124
TABELA 24 – QUADRO RESUMO DAS FUNCIONALIDADES DOS UAV	125

Acrónimos

AAN	–	Autoridade Aeronáutica Nacional
ADS-B	–	Automatic Dependent Surveillance-Broadcast
AI	–	Artificial Intelligence
ANAC	–	Autoridade Nacional de Aviação Civil
ASPRS	–	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
BFD	–	Bird Flight Diverter
BVLOS	–	Beyond Visual Line of Sight
COSREN	–	Classificação da Ocupação do Solo (Cópia Digital)
COVID-19	–	2019 novel coronavirus disease
CTR	–	Zona de Controlo Aéreo
DSM	–	Digital Surface Model
FPV	–	First Person View
FX	–	Solução de Asa Fixa (Estimativa 1)
FX2	–	Solução de Asa Fixa (Estimativa 2)
GCP	–	Ground Control Point
GCS	–	Ground Control Station
GIS	–	Geographic Information System
GPS	–	Global Positioning System

GSD	–	Ground Sampling Distance
HC	–	Metodologia de Helicóptero
IMD	–	Inspeção de Medição de Distâncias
IMU	–	Inertial Measurement Unit
INC	–	Caracterização da Nidificação da Cegonha
INS	–	Inertial Navigation System
IT	–	Inspeção Termográfica
IV	–	Inspeção Visual
LiDAR	–	Light Detection and Ranging
MAT	–	Muito Alta Tensão
MP	–	Mega Pixel
MW	–	Mega Watt
OPGW	–	Optical Ground Wire
PPK	–	Post-Processing Kinematic
ROW	–	Right-of-Way
RSLEAT	–	Regulamento de Segurança de Linhas de Alta Tensão
RT	–	Solução de Asa rotativa (Estimativa 1)
RT2	–	Solução de Asa Rotativa (Estimativa 2)
RTK	–	Real Time Kinematic
SF6	–	Hexafluoreto de Enxofre
TSO	–	Transmission System Operator

UAS	–	Unmanned Aerial System(s)
UAV	–	Unmanned Aerial Vehicle(s)
UAV1	–	Solução Asa Rotativa com Asa Fixa (Estimativa 1)
UAV2	–	Solução Asa Rotativa com Asa Fixa (Estimativa 2)
UBIT	–	Under Bridge Inspection Truck
UV	–	Ultravioleta

1. INTRODUÇÃO

O presente relatório baseia-se num estudo realizado no âmbito da aplicabilidade de novas ferramentas e serviços nas metodologias de gestão da rede elétrica nacional. Em questão estão as inspeções aéreas das infraestruturas da rede elétrica e o desempenho dos drones nesta área. Com isto, pretende-se apresentar o estado da arte destas ferramentas, cujas tecnologias têm-se desenvolvido para um ritmo profissional, e verificar se de facto cumprem com os requisitos técnicos e económicos da atual metodologia.

As inspeções são uma ferramenta de gestão e engenharia em qualquer serviço ou indústria, de forma a garantir o bom funcionamento das instalações e em especial no transporte de grandes quantidades de energia onde se pretende o máximo de fiabilidade e qualidade de energia ao longo de extensos quilómetros. Sendo este aspeto vital na gestão da rede, este trabalho surge de uma oportunidade da REN de avaliar em que medidas os drones conseguirão otimizar as atuais metodologias.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A distribuição e transporte de energia é da responsabilidade de entidades reguladoras (designadas, TSO (Transmission System Operator's)) que exploram, coordenam e garantem o bom funcionamento da rede e dos seus equipamentos mantendo a gestão das instalações e dos extensos corredores de linhas de transporte. Esta gestão monitoriza o estado dos ativos (equipamentos) e gere os contratos de manutenção e de inspeção da rede.

Para garantir a fiabilidade pretendida da rede, a gestão baseia-se principalmente na técnica de manutenção preventiva, que implica garantir o bom funcionamento dos equipamentos para que nestes não apareçam anomalias e não sejam retirados de serviço. Assim, a manutenção preventiva tem por hábito a inspeção dos diversos ativos, de modo a caracterizar o estado dos troços inspecionados e acionar planos de manutenção ativa em situações de risco.

As linhas aéreas de transporte estão sujeitas à exposição a ambientes adversos durante todo o tempo que estão em serviço e vão-se degradando, perdendo a qualidade de funcionamento pretendida. No entanto, a avaria de certos equipamentos afeta mais a qualidade de serviço da rede que outros, por isso é necessário caracterizar o estado de todos os ativos e determinar quais os que efetivamente requerem planos de manutenção, pois não é economicamente viável a manutenção ativa de todos os equipamentos.

Assim, a inspeção de vasta rede elétrica fornece os dados necessários à caracterização do estado dos ativos. O presente trabalho enquadra as principais metodologias de inspeção de linhas geridas pela REN (Redes Energéticas Nacionais), a entidade que opera a rede nacional de transporte (RNT).

Estas metodologias estão a ser aplicadas há vários anos na gestão da rede. Inspeccionar os extensos corredores da rede é uma tarefa dispendiosa e morosa e por isso é frequente o recurso a serviços aéreos de helicópteros. Estes são grandes veículos que percorrem longas distâncias junto das linhas aéreas e que fazem o levantamento dos dados pretendidos para a caracterização do estado dos ativos.

No entanto, a REN pretende sempre acompanhar o avanço tecnológico e adaptar nas metodologias os aspetos que se verifiquem vantajosos. Como se verifica na figura 1, que representa as tecnologias que poderão revolucionar a realidade profissional e quotidiana[1], os drones/veículos autónomos enquadram estas tecnologias inovadoras e apresentam funcionalidades semelhantes aos helicópteros no ponto de vista da inspeção.



Figura 1 – Gartner Hype Cycle de Tecnologias Emergentes em 2019 [1]

Os drones enquadram diversas tecnologias apresentadas na representação gráfica da potencialidade de novas tecnologias de resolverem problemas reais e explorarem novas oportunidades num ambiente profissional (como flying autonomous vehicles, light cargo delivery drones, edge AI (Artificial Intelligence), entre outras). Isto verifica-se pelo menos nos últimos três anos [2], sendo que algumas das tecnologias aqui apresentadas adaptaram-se em torno dos drones. São assim uma tecnologia muito explorada com um grande alcance de aplicações. Esta curva de potencialidades nem teria em conta uma pandemia (COVID-19), que congelou a maioria do mundo, mas que acelerou ainda mais o progresso dos drones num ambiente de distribuição de mercadorias, onde se garante assim o mínimo de contacto social possível e melhorando mesmo as características económicas da distribuição tradicional [3].

Com isto, o principal objeto de estudo deste trabalho serão os drones profissionais que poderão enquadrar as inspeções visuais da rede de transporte.

1.2. OBJETIVOS

Como contextualizado, este trabalho pretende analisar a viabilidade e qual a aplicabilidade dos drones nas atuais metodologias de inspeção da RNT. Para isso, definiram-se os seguintes objetivos:

- Identificar o estado da arte dos drones profissionais;
- Averiguar a aplicabilidade no contexto da inspeção visual da RNT;
- Analisar economicamente a aplicação desta nova ferramenta.

Estes objetivos permitirão à REN ficar a conhecer as funções dos drones, o atual mercado onde se inserem e de que modo estes poderão enquadrar as metodologias de inspeção. Assim, este trabalho serve para apoiar a REN na tomada de decisões acerca destas ferramentas, após esta realidade ser explorada neste documento.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Esta análise teve a duração de 6 meses e foi realizada durante um estágio nas instalações da REN Vermoim, junto da divisão de Gestão de Ativos, no departamento de Programação e Otimização de Ativos. Para a concretização deste trabalho foi disponibilizado o acesso a especificações técnicas dos ativos, contratos e orçamentos das inspeções, demonstrações do desempenho dos drones e acompanhamento em trabalhos pela REN, sempre com orientação por parte dos representantes deste departamento.

O desenvolvimento do seguinte trabalho assenta em três principais capítulos, que visam enquadrar e detalhar os objetos de estudo. Assim, o relatório apresenta a seguinte estrutura:

- Capítulo 1 contextualiza o tema do trabalho e apresenta os objetivos que serão explorados;
- Capítulo 2 referente à RNT, que introduz os ativos que são alvo das metodologias de inspeção;

- Capítulo 3 apresenta o estado da arte dos drones profissionais, desde a regulamentação aos sensores de controlo e de levantamento aéreo;
- Capítulo 4 onde são apresentados os resultados da aplicabilidade e dos aspetos económico-temporais do enquadramento dos drones nas inspeções aéreas.

Por fim, todos estes capítulos serão sucintamente concluídos de forma a apresentar uma resposta aos objetivos propostos no início do trabalho.

1.4. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Contextualizado o trabalho, os capítulos que se seguem visam responder os objetivos aqui introduzidos de forma a que a REN possa tomar decisões acerca desta ferramenta. Para isso serão estudadas as tecnologias e entidades do mercado dos UAV e realizada uma análise da aplicabilidade na rede. Sendo a divisão de gestão de ativos uma área fundamental para a fiabilidade da rede, a importância deste trabalho enquadra na otimização das metodologias de inspeção nas quais dependem esta gestão.

2. REDE NACIONAL DE TRANSPORTE

O presente capítulo pretende contextualizar a rede nacional de transporte e os equipamentos que a constituem, uma vez que este trabalho está relacionado com as metodologias de inspeção dos diversos ativos, então esses ativos serão agora descritos tal como as metodologias que monitorizam o estado dos mesmos. No âmbito das inspeções, é importante reconhecer os ativos e os defeitos que mais aparecem na rede, isto é, nas inspeções é essencial saber quais os ativos que se está a observar e os defeitos que se devem procurar.

2.1. LINHAS AÉREAS EM MUITO ALTA TENSÃO

A rede nacional de transporte distribui a energia elétrica em M.A.T. (Muito Alta Tensão) em todo o território nacional tendo assim uma vasta gama de infraestruturas e equipamentos que requerem uma constante inspeção.

Tabela 1 – Comprimento das Linhas Elétricas Aéreas da RNT [4]

Nível de Tensão (kV)	Comprimento das Linhas (km)
400	2711
220	3746
150	2544
Total	9002

As linhas estendem-se por mais de 7400 km de faixa (tabela 1) com cerca de 19 mil apoios, logo a quantidade de ativos é elevada e assim requiere uma gestão regular de toda a infraestrutura. Na sua generalidade, as linhas aéreas são constituídas pelos apoios, cabos condutores e de guarda, cadeias de isoladores e respetivos acessórios adicionais [5]. De seguida, estes ativos serão introduzidos por serem o objeto de análise das inspeções.

2.1.1. APOIOS

Os apoios da RNT são, na sua maioria, estruturas de aço reticulados com cantoneiras e chapas aparafusadas. Estes são projetados de modo a otimizar a sua montagem e poderem mais tarde sofrerem remodelações, designadas por *uprating* do apoio [6].

Os apoios são caracterizados como apoios de linhas simples (apoios com um circuito) em esteira, horizontal ou vertical, apoios de linhas duplas (dois circuitos) e apoios de linhas triplas em esteira triangular (três circuitos) [7].

Para além do número de circuitos, os apoios são classificados pela topologia das cadeias de isoladores que possuem (figura 3). Um apoio de amarração é mais robusto estando sujeito a mais esforços, são instalados quando é necessário alterar a direção da linha, por exemplo. Por outro lado, os apoios de suspensão, encontram-se em troços de linhas retilíneos [7].



Figura 3 – Apoio simples de amarração; Apoio triplo de suspensão [6]

Antes de instalados os apoios, as fundações destes são construídas com 4 maciços de betão independentes que devem ser capazes de sustentar todos os esforços que a estrutura possa sofrer (figura 4), como a tração dos cabos ou as condições atmosféricas. Assim, as fundações, tal como os restantes ativos, devem cumprir as regras descritas no RSLEAT (Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão) [8].



Figura 4 – Fundação de um Apoio [5]

Durante a construção das fundações é preparada a ligação do apoio a uma malha de terra, que reduz as correntes de defeito, as tensões de passo e contacto e o contornamento das cadeias de isoladores. O apoio é ligado à terra por um contacto em cobre, que por sua vez se liga à terra por eléktrodo de terra, fabricados e revestidos em cobre [7]. Estando enterrados após a construção do apoio, não são frequentemente alvo de inspeções.

2.1.2. CABOS

As linhas aéreas são tipicamente conduzidas por dois tipos de cabos: os cabos condutores, onde circula a energia e os cabos de guarda, que protegem a infraestrutura de descargas atmosféricas [5].

Os cabos condutores são cabos multifilares nus que podem ser de liga de alumínio, de alumínio com alma de aço ou com alma de compósito. O alumínio é responsável pelas propriedades eléctricas do cabo e é um leve e bom condutor e os fios de aço aguentam as propriedades mecânicas dos esforços nos cabos [9].

Na RNT, em função do nível de tensão da linha, são utilizados cabos Bear (ou Aster), Zebra ou Zambeze (figura 5).

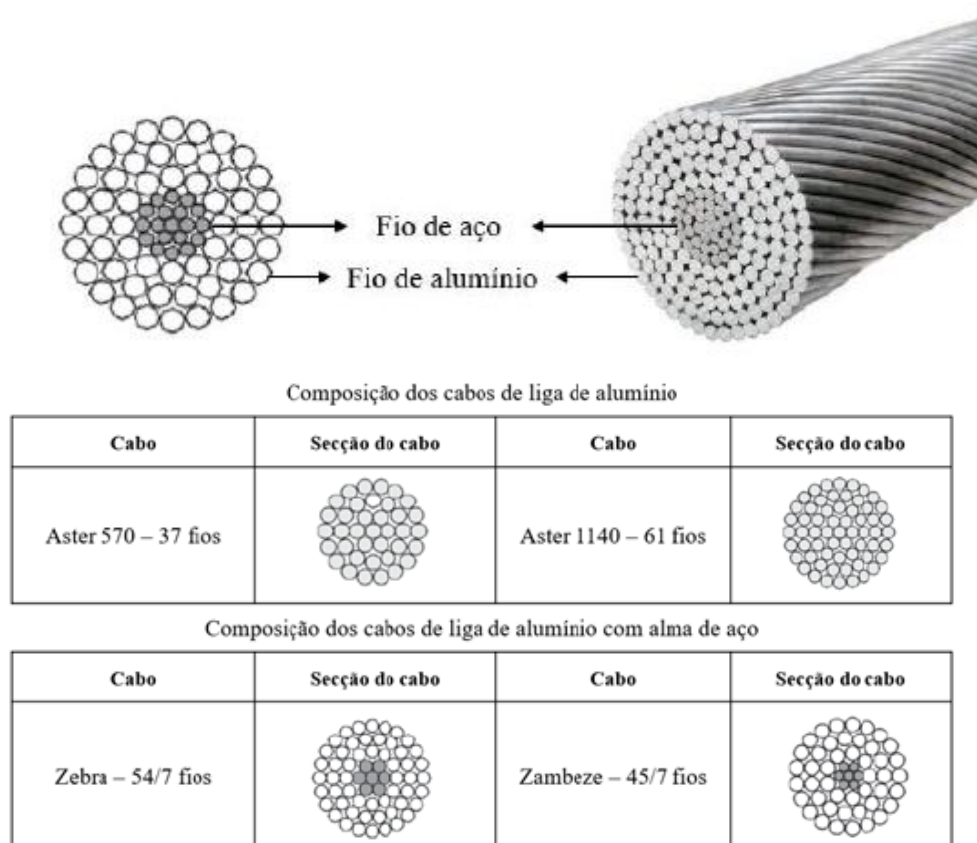


Figura 5 – Cabos condutores utilizados na RNT [6]

Em níveis de tensão de 400 kV, é comum utilizar-se dois (por vezes, três) cabos condutores por fase de forma a reduzir as perdas de energia nos cabos, aumentando a capacidade de transporte da linha.

Por outro lado, os cabos de guarda unicamente utilizados são do tipo OPGW (Optical Power Ground Wire, figura 6) [10]. Estes são cabos multifilares nus com as mesmas características mecânicas e elétricas de um cabo de guarda convencional. Geralmente são colocados dois cabos a uma altura superior dos cabos condutores, para proteger a linha contra descargas atmosféricas e outros defeitos elétricos como curto-circuitos ou contornamentos ao interligar as redes de terra dos apoios e subestações. Para além disso, este cabo tem a particularidade de possuir fibras óticas que estabelecem uma rede de telecomunicações com diversas aplicabilidades [7].

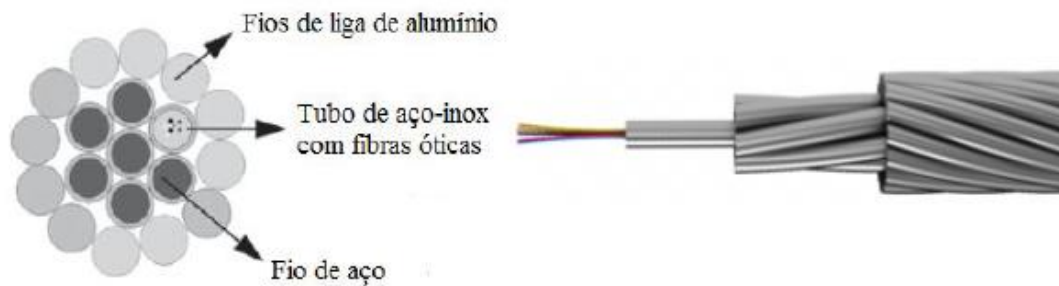


Figura 6 – Cabo de guarda OPGW [6]

2.1.3. CADEIAS DE ISOLADORES

As cadeias de isoladores têm uma das principais funções de todos os ativos das linhas, sendo que são os elementos que mais manutenção podem requerer para o bom funcionamento da rede. Os isoladores mantêm o isolamento elétrico entre os cabos condutores e todas as estruturas metálicas do apoio, para além de apoiar mecanicamente os cabos [7].

As cadeias podem ser de campânula e espigão, de vidro ou cerâmica ou do tipo varão com material compósito (figura 7) [5].

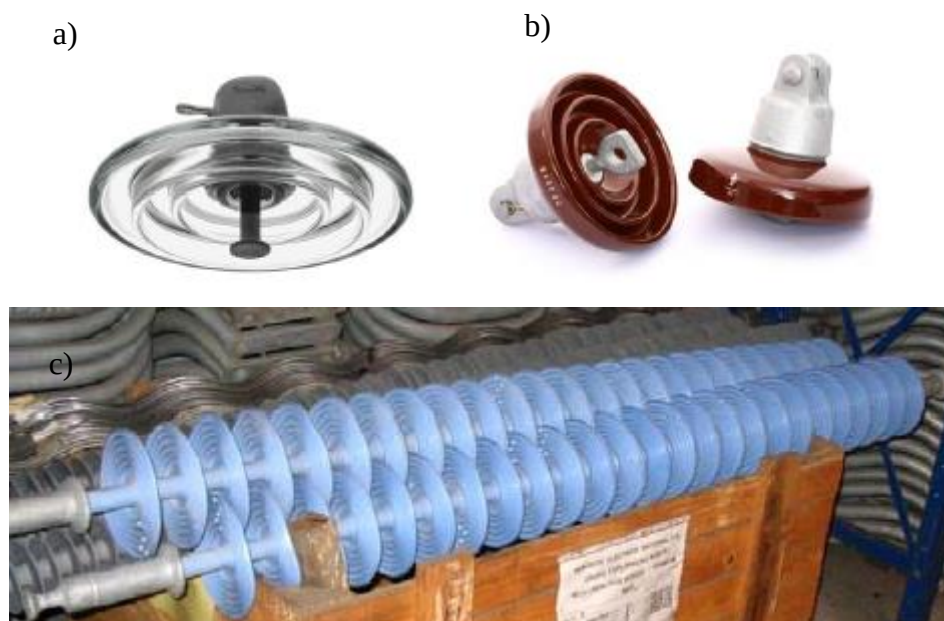


Figura 7 a) Isolador de vidro b) Isolador de Cerâmica c) Isolador Compósito [5]

Como referido, as cadeias podem estar sujeitas a mais inspeções e manutenções de modo a garantir o bom funcionamento da rede, pois estes estão muito sujeitos a poluição que pode quebrar a principal função de isolamento. Assim, a escolha dos tipos de isoladores depende do nível de poluição e das condições atmosféricas do local de instalação, que influenciam o comprimento das linhas de fuga dos isoladores.

Com isto, a linha de fuga das cadeias em zonas de poluição ligeira deve ser de 20 mm/kV e de 25 mm/kV em zonas de poluição forte. Os locais de poluição mais forte devem ser estudados caso a caso. O número de isoladores por cadeia deve ter em conta o nível de poluição e os níveis de tensão da linha de modo a cumprir com este requisito [11].

Dos tipos de cadeias destacam-se os isoladores compósitos por apresentarem menos esforços no apoio e pela característica hidrofóbica, que repele partículas de água, reduzindo a poluição instalada e consequente manutenção das cadeias [7].

As cadeias são protegidas de arcos elétricos, de contornamentos e do efeito coroa por hastes de descarga, por anéis de descarga ou uma instalação mista destes componentes.

2.1.4. ACESSÓRIOS

Para além dos principais ativos das linhas anteriormente mencionados, existem outros conjuntos de elementos que são alvo de monitorização e manutenção. Entre estes estão elementos de suporte mecânico da estrutura, sinaléticas informativas e de alerta e equipamentos que visam diminuir os problemas da avifauna.

Pinças de Fixação

Os cabos são apoiados às estruturas através de pinças de amarração ou suspensão, conforme a tipologia do poste. Essencialmente, as pinças fixam mecanicamente os cabos aos apoios e minimizam o efeito das vibrações que podem causar roturas nos cabos [5].

Nas pinças de amarração (figura 9), o transporte de energia é assegurada por um condutor suspenso entre montante e jusante do apoio, designado fiador, ao contrário das pinças de suspensão (figura 8) em que o condutor interceta a pinça.

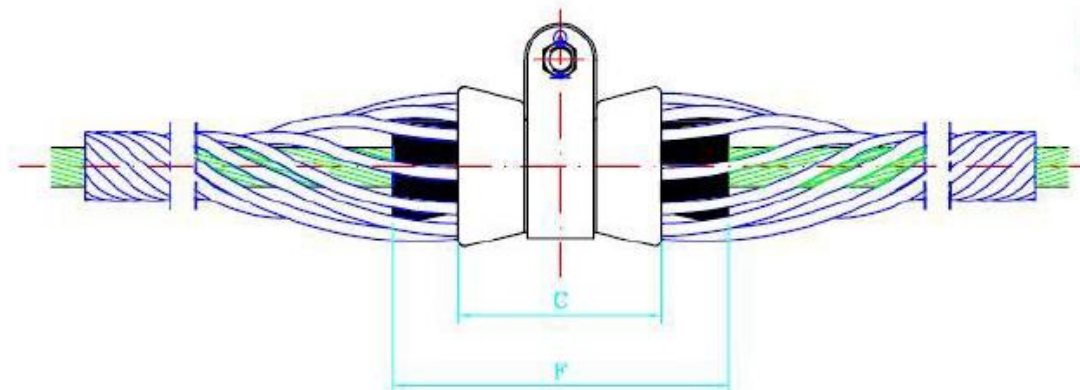


Figura 8 – Pinça de suspensão [5]

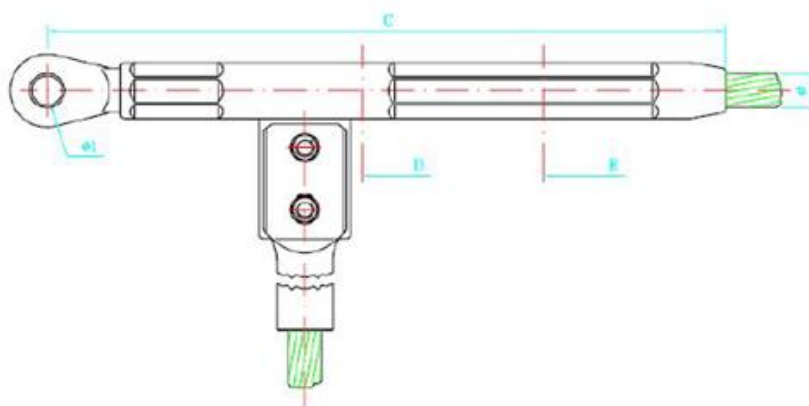


Figura 9 – Pinça de amarração [5]

Amortecedores



Figura 10 – Geometria dos vãos de linhas elétricas (fonte própria)

As vibrações provocadas pela força do vento nos cabos são transmitidas para toda a estrutura causando esforços excessivos. A vibração depende da geometria dos vãos (exemplificado na figura 10), das características de inércia e elasticidade, do regime de ventos e do regime de tração permanente [7]. Assim, nos cabos, junto dos apoios é frequente a colocação de amortecedores (figura 11) projetados em função destas características que equilibram as vibrações nos condutores.



Figura 11 – Amortecedor [6]

Separadores de Feixe

Como referido anteriormente, nas linhas com níveis de tensões elevadas pode ser necessário colocar dois ou mais condutores por fase, otimizando a capacidade de transporte e reduzindo as perdas nos condutores. Para isso são colocados separadores (figura 12) que mantêm a distância entre os cabos da mesma fase e certos separadores têm a função amortecedora como o equipamento anterior [5].



Figura 12 – Separador de feixe com capacidades amortecedoras [6]

Sinaléticas Informativas

Os apoios da RNT devem possuir sinaléticas visíveis do solo que identificam o apoio e alertam para perigos e socorro.

Assim, na figura 13 estão apresentadas as sinaléticas obrigatórias, que correspondem a [12]:

- Chapa tipo A – perigo de morte e identificação do apoio;
- Chapa tipo B – identificação da linha e contacto do departamento responsável;
- Chapa tipo C – identificação aérea do apoio;
- Chapa tipo D – identificação da REN.



Figura 13 – Sinaléticas obrigatórias nos apoios da RNT [6]

Balizagem

A balizagem dos apoios e dos condutores pretende sinalizar a presença dos mesmos nas imediações. Estas soluções podem-se encontrar nos condutores ou no próprio apoio, com a pintura da estrutura de cor laranja internacional e branca [6].

Por outro lado, a balizagem dos cabos deve ser visível de dia e durante a noite. Na balizagem diurna (figura 14), são colocadas esferas com as mesmas cores (laranja e



Figura 14 – Balizagem diurna espaçada e alternada nos cabos de guarda [6]

branca), espaçadas de 60 metros e dispostas alternadamente em cada um dos cabos de guarda [13]. Estas são tipicamente colocadas em travessias sobre rios e autoestradas ou locais em que seja recomendável a sinalização para as aeronaves.

A balizagem noturna consiste em dispositivos que iluminam à noite, carregados por painéis solares ou pelo efeito de Lenz provocado pelo campo magnético dos condutores [13].

Avifauna

As linhas aéreas estão sujeitas a influencias de aves, quer nos condutores, quer na nidificação nos apoios. Assim, em troços de linhas referenciados pela migração de aves é colocada sinalização para avifauna, designada BFD (Bird Fly Diverter, figura 15) [5], que aumentam a visibilidade dos cabos e evitam que as aves colidam com os mesmos.

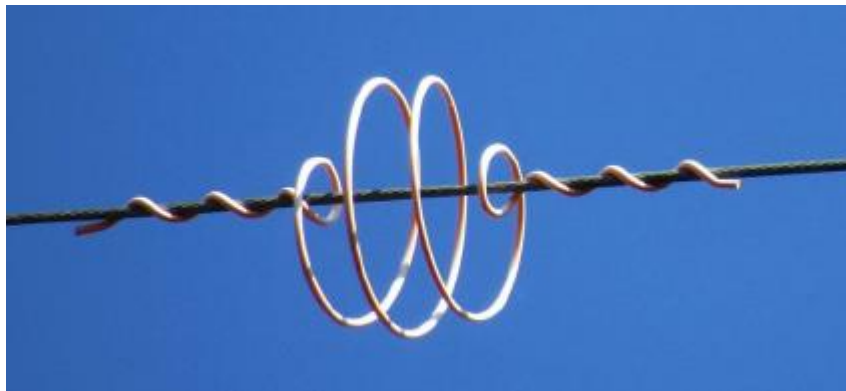


Figura 15 – Bird Fly Diverter (BFD) [6]

Por outro lado, em troços específicos da rede é frequente a nidificação de cegonhas nos apoios, responsável por grande percentagem de incidentes na linha, por exemplo, ao poluir as cadeias com os seus excrementos.

Assim, a REN desenvolveu uma solução de gestão da nidificação através de inibidores de poiso (figura 17) colocados em locais mais críticos, principalmente diretamente por cima das cadeias de isoladores [5].



Figura 17 – Inibidores de Pouso [6]

No entanto, as cegonhas conseguem nidificar, por isso, junto do Instituto de Conservação da Natureza, é frequente a deslocação dos ninhos para designadas plataformas de nidificação (figura 18), afastadas das cadeias, sem ameaçar a vida das cegonhas.



Figura 16 – Nidificação da cegonha nos apoios da RNT deslocada para uma plataforma de nidificação [6]

2.2. SUBESTAÇÕES

As subestações elétricas são instalações que se inserem nas redes de transporte e adequam os níveis de tensão para as necessidades pretendidas ao controlarem o fluxo de potencia desde a geração até à carga.

São interligações na rede das linhas, denominados “nós de rede” e por isso são possíveis inúmeros cenários de exploração [14]. Os níveis de tensão em que operam são também 150, 220 e 400 kV. Certas subestações incluem os três níveis de tensão e por isso são grandes instalações, com diversos equipamentos que requerem uma manutenção mais ativa do que visual [15].

As subestações são classificadas conforme relacionam a produção, o cliente e a distribuição. Isto é, classificam-se conforme as necessidades elevadoras, abaixadoras, de manobra e de conversão de energia.

As subestações podem ser exteriores, onde o isolador é o ar, ou interiores, blindadas com um gás isolante, SF₆ (Hexafluoreto de Enxofre). As últimas são mais pequenas, mesmo em grandes níveis de tensão, mas são no interior de um edifício, protegidas do meio ambiente [16].

2.2.1. PAINEL E EQUIPAMENTOS

As subestações funcionam sobre painéis (figura 18), enquadrado no nível 0 da arquitetura da subestação, com a função de manobrar, transformar e compensar. Os painéis podem ter várias configurações como painel interbarras, de transformação e de baterias de condensadores. Na generalidade, os painéis são constituídos por barramentos e outros equipamentos como disjuntores, seccionadores e transformadores [14].

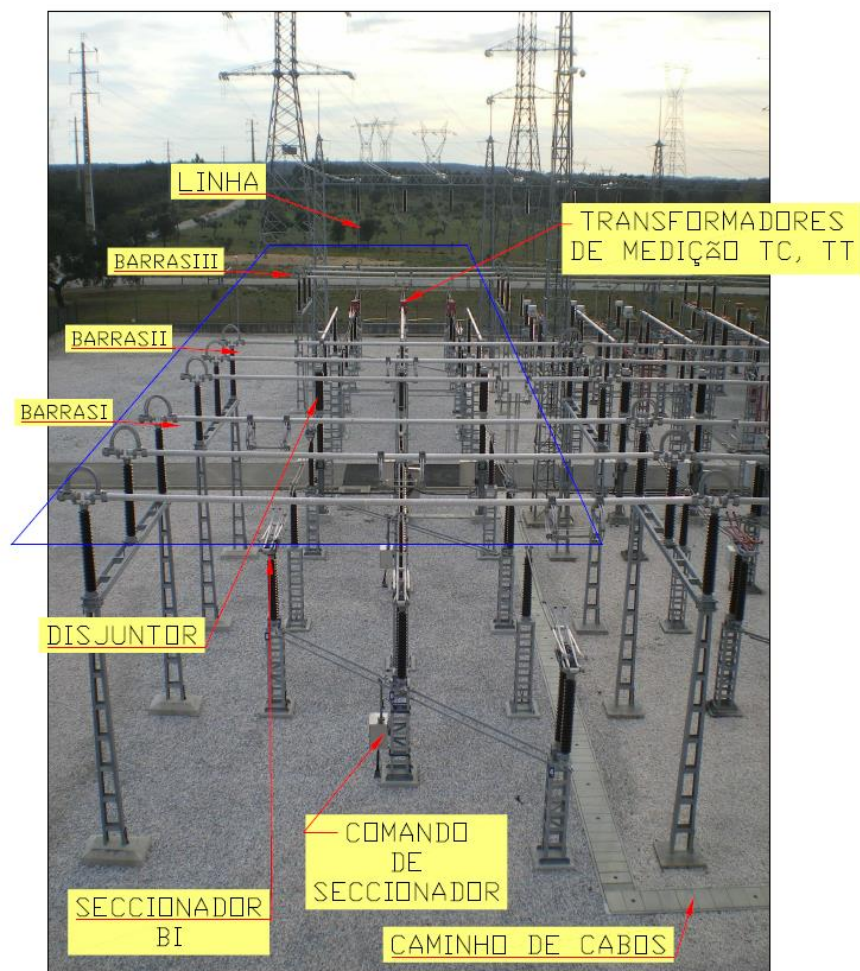


Figura 18 – Painel de uma subestação e equipamentos que o compreendem [14]

No conjunto, os diferentes painéis constituem topologias de duplo barramento, triplo barramento ou disjuntor e meio.

Disjuntores

Os disjuntores (figura 19) são dos principais equipamentos de uma subestação pois conferem a proteção da rede, das instalações e de pessoas ao funcionarem nos valores nominais para que foram concebidos e conferem a capacidade de corte (não visível) em carga [17].

Esta interrupção acontece devido a correntes, curto-circuitos, originados por afinação, fuga e desgaste do material. O disjuntor atua quando, por estes motivos, os contactos elétricos separam, criando um arco elétrico suprimido no interior do disjuntor por meio dielétrico, novamente o SF6.

Pela sua importância na rede, os disjuntores são alvo de manutenção mais regular, fora de serviço, simulando atuações de defeito que avaliam o seu comportamento.

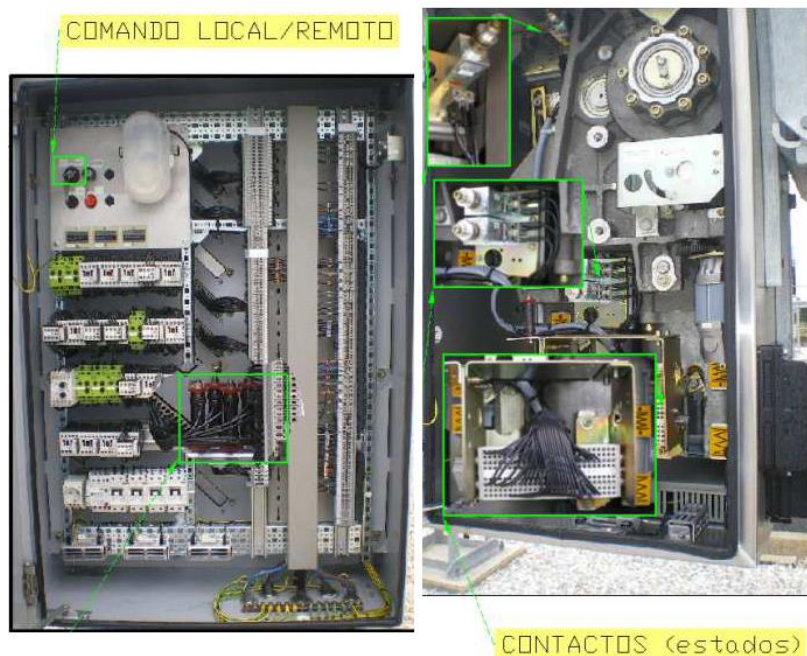


Figura 19 – Disjuntor – comando de controlo e contactos de atuação [14]

Seccionadores

Os seccionadores têm a função de isolar os circuitos com corte visível. Os seccionadores (figura 20) retiram determinado barramento de serviço. Em função dos níveis de tensão 60, 150 e 220 kV, são do tipo Horizontal. Para níveis de 400 kV, os seccionadores são obrigatoriamente de abertura Vertical [13].



Figura 20 – Seccionador do barramento [14]

Transformadores de Potência

Os transformadores, como o nome indica, fazem a transformação dos níveis de tensão. Estes têm a função das subestações, de converter a energia de tensões superiores para inferiores (transformador abaixador) e vice-versa (transformador elevador) [12][18].

Pelos vários perfis de consumo numa rede, existe a necessidade de implementar diversos níveis de tensão e por isso, vários transformadores numa só subestação. Estes são de grande dimensão devido a sua funcionalidade elétrica sobre muito altas tensões, com grandes perdas de Joule associadas.

Por outro lado, são comuns também autotransformadores, que facilitam o trânsito e o controlo de potências [19].

Transformadores de Medição

Todo o controlo da rede e da subestação implica monitorizar o fluxo de energia entre diferentes pontos na rede.

Assim, os transformadores de medição distinguem-se entre medidores de corrente e de tensão (figura 21). Estes equipamentos encontram-se sobre estruturas metálicas ou de betão, ligados à terra e tipicamente nas extremidades dos painéis. Estão, portanto, sujeitas às condições ambientais de serviço [13].



Figura 21 – Transformador de corrente (esquerda) e transformador de tensão (direita) [14]

Com isto, todos estes e outros equipamentos estão sujeitos a uma gestão regular para que a rede apresente a fiabilidade pretendida e uma máxima continuidade de serviço.

Toda a instalação deve estar sujeita a métodos de inspeção, visual e termográfica que permite detetar defeitos elétricos de um destes componentes que realizam varias manobras e estão muito tempo em serviço, por isso requerem um cuidado mais ativo do que passivo, isto é, para além da inspeção visual.

O principal objeto de trabalho será a inspeção visual, que se enquadra de momento na funcionalidade dos drones. Assim, será considerada de que forma os drones complementam os trabalhos nas subestações.

2.3. ATUAIS METODOLOGIAS DE INSPEÇÃO

Os ativos mencionados anteriormente constituem os principais equipamentos da RNT e para uma maior fiabilidade da rede, estes são alvo de uma gestão regular que tem por base a inspeção, a monitorização e a manutenção dos ativos mais críticos.

Os ativos sofrem o desgaste natural dos equipamentos, no entanto, há certos fenómenos que estão por detrás de um grande número de avarias todos os anos. Certa parte da gestão da rede passa por minimizar estes fenómenos através da manutenção preventiva. Entre estes estão [5]:

- As descargas atmosféricas;
- Os incêndios florestais;
- A poluição nos isoladores;
- A nidificação das cegonhas nos apoios.

As descargas atmosféricas são o fenómeno mais natural e imprevisível, mas o que causa mais interrupções na rede. As descargas aumentam o potencial elétrico na zona de descarga, aumentando as correntes de descarga até ao limite de isolamento.

Geralmente, as descargas atingem os cabos de guarda e, se o aumento de potencial provocar a queda de isolamento, é criado um caminho alternativo para as correntes de descarga, circulando a corrente do cabo condutor para o apoio [5].

Em zonas rurais e florestais, todos os anos existe um período de grande número de incêndios que põe em causa as linhas de vários aspetos.

O fumo da combustão carregado de partículas de carbono é mais condutor que o ar, sendo que a alteração das propriedades dielétricas do local leva ao contornamento entre as fases, a vegetação e o apoio. Por outro lado, um incêndio nas proximidades pode provocar cortes momentâneos no fluxo da linha e ao retiro de serviço [5].

Ao longo dos vastos corredores de linhas é visível o desbastamento de certas espécies de vegetação para evitar que os fogos se aproximem das linhas e que a própria vegetação interfira com os condutores [20]. Na figura 22 é ilustrado como deve ser gerido o corte da vegetação sob os corredores de linhas elétricas.



Figura 22 – Gestão da vegetação sob a faixa de servidão das linhas elétricas [20]

Como referido anteriormente, a poluição que se instala (visível na figura 23) junto das condições atmosféricas, reduz a rigidez dielétrica das superfícies isolantes. Entende-se por poluição uma camada sobre a superfície isolante constituída por substancias dissolvidas em agua que produzem soluções condutoras. Destas camadas ocorre a formação de arcos sobre a superfície que rompe e corrói a cadeia de isoladores.

Assim, em certos locais são instalados isoladores antipoluição, como os isoladores de vidro e cerâmica ou de compósito, com maiores ranhuras e consequente linha de fuga e capacidades hidrofóbicas, respetivamente. No entanto, estes elementos requerem uma monitorização regular para determinar a manutenção e limpeza destes componentes cruciais na RNT.

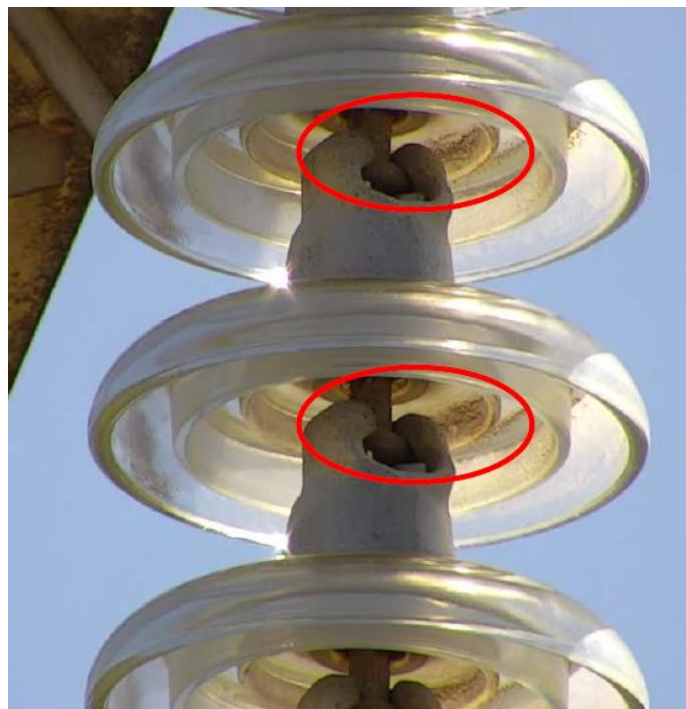


Figura 23 – Poluição visível nos isoladores de vidro (fonte: REN)

Como também referido anteriormente, outra forma de poluição nos isoladores é a habitual nidificação das cegonhas em locais altos, como os apoios das linhas e crucialmente sobre as cadeias de isoladores. Assim, a REN opta por deslocar os ninhos para outros locais no apoio mas, sendo este hábito regular, é necessário identificar e atualizar as situações mais críticas numa gestão de ninhos. A figura 24 é um exemplo deste problema num apoio, no entanto, isto verifica-se na maioria dos postes de determinadas linhas.

Por estes motivos, a inspeção dos mais diversos ativos é importante para a manutenção preventiva da rede e de seguida serão apresentadas as metodologias de inspeção em prática na REN.



Figura 24 – Nidificação da cegonha sobre os apoios da RNT (fonte: REN)

2.3.1. INSPEÇÕES VISUAIS TERRESTRES

As inspeções visuais terrestres, como o nome indica, são inspeções onde a equipa se desloca pelo solo, com jipes e binóculos e outras ferramentas que possam ser necessárias na determinada inspeção [21].

Estas têm o objetivo de verificar visualmente o estado dos apoios, dos isoladores e dos condutores e por vezes a medição de terras e termografia dos elementos sob tensão. Podem ser pormenorizadas, pontuais em situações de emergência ou de rotina [21].

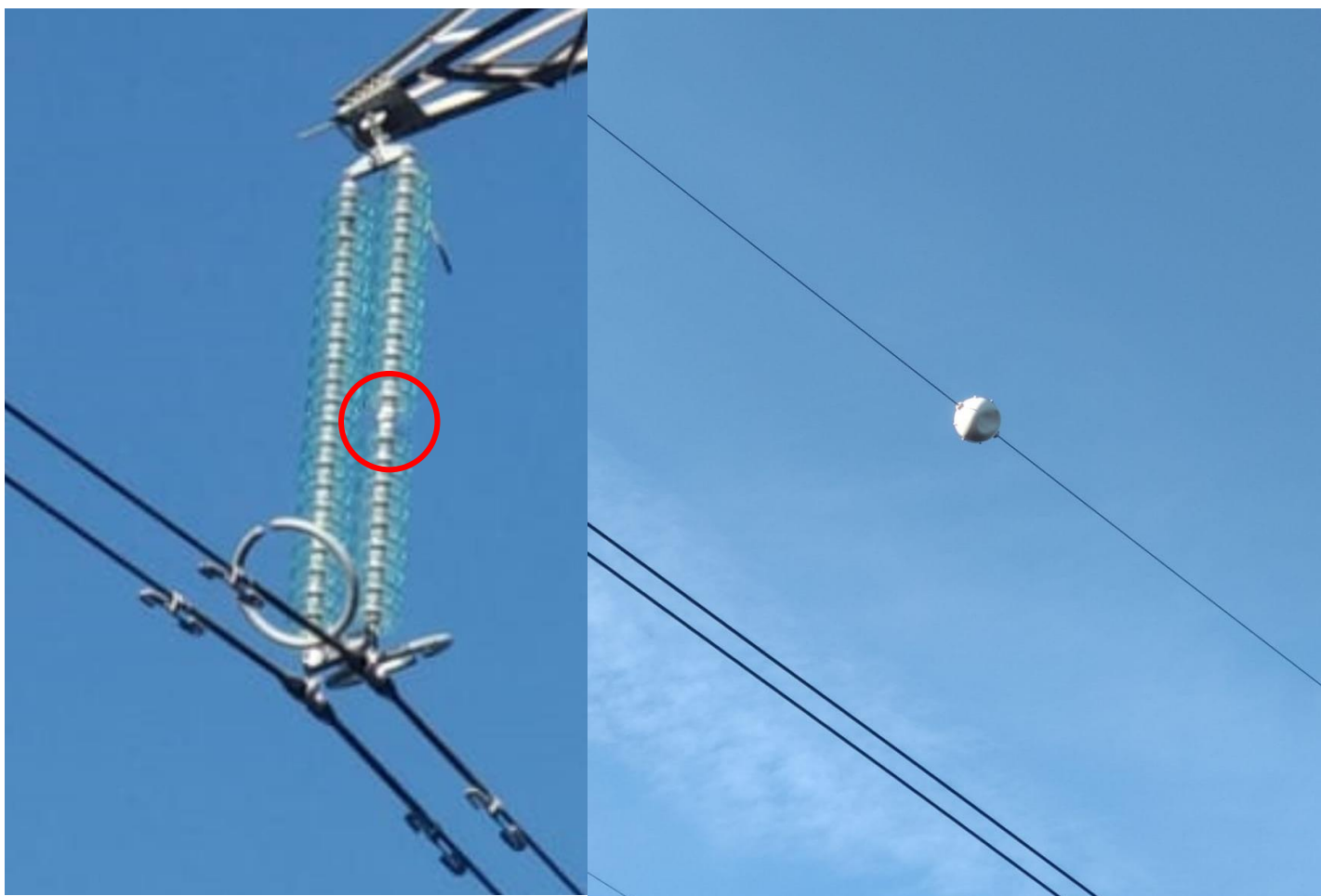


Figura 25 – Exemplo de defeitos detetados numa ronda terrestre: isoladores de vidro partidos e esferas de balizagem queimadas (fonte própria)

Sendo que estas inspeções não requerem uma ferramenta concreta, a inspeção não é tão detalhada como a metodologia seguinte, pois certos defeitos são difíceis de identificar através do solo, como se verifica pela figura 25. Nos capítulos seguintes irá ser

demonstrado de que forma os drones poderão enquadrar e complementar este contexto, ou seja, a aplicabilidade dos drones nas inspeções da RNT.

Destas inspeções denota-se a difícil e morosa deslocação terrestre entre os apoios, assim a vantagem da próxima metodologia.

2.3.2. INSPEÇÕES AÉREAS

As inspeções aéreas são a principal metodologia de inspeção, a metodologia que mais dados oferece para a gestão dos ativos e a monitorização da rede. Esta permite identificar o estado dos ativos de modo a manter uma base de dados atualizada e determinar zonas críticas de manutenção.

Assim, esta metodologia tem como objetivo quatro produtos distintos, nomeadamente [21]:

- inspeção visual pormenorizada, por exemplo, de corrosão ou poluição (IV);
- inspeção termográfica para identificação de anomalias elétricas (IT);
- medição de distâncias críticas da vegetação através da cópia digital das linhas (IMD);
- caracterização da nidificação de cegonhas (INC).

Este serviço é realizado exclusivamente através de helicópteros, veículos aéreos que percorrem grandes distâncias, com grandes capacidades de carga útil (payload), como a equipa e a instrumentação. Estas operações levam geralmente três elementos na equipa (piloto, técnico da inspeção e especialista) e recorrem a sensores termográficos, óticos e LiDAR (Light Detection and Ranging) para realizar o levantamento aéreo pretendido na gestão de ativos.



Figura 26 – Instrumentação LiDAR acoplada ao helicóptero (fonte: REN)

Esta metodologia é eficaz pois permite percorrer longos corredores de linhas de uma só vez (cerca de 250 km por dia) e ao mesmo tempo apresentar os serviços mencionados. No entanto, a disponibilidade destes veículos não é tão flexível e apresenta custos acrescidos.

Entre a figura 26 e a figura 27 verifica-se a capacidade do helicóptero de fazer dois levantamentos distintos (visual e LiDAR) enquanto percorre a linha uma única vez. As figuras foram retiradas do mesmo serviço. Tal como estes sensores, também são acoplados sensores termográficos que permitem realizar três tipos de levantamentos distintos. Por exemplo, as uniões e reparações a meio dos vãos podem revelar anomalias em infravermelhos, por vezes difíceis de detetar do chão e visualmente. Estas tecnologias de levantamento aéreo serão aprofundadas mais adiante.



Figura 27 – Exemplo do levantamento aéreo visual de um helicóptero (fonte: REN)

Outro dos principais objetos de estudo deste trabalho será a análise da viabilidade dos drones em substituir os serviços prestados nesta metodologia, pelos helicópteros.

2.4. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Este capítulo pretende identificar os ativos da rede elétrica nacional e o que motivam as suas inspeções, desde os fenómenos mais recorrentes à importância das suas funções. As inspeções, sendo essencialmente a monitorização do estado dos equipamentos, são geralmente serviços prestados por helicópteros, ao encargo de outras entidades.

3. ESTADO DA ARTE DOS UNMANNED AERIAL VEHICLES

A crescente utilização dos UAV (Unmanned Aerial Vehicle ou Drone) começou para fins recreativos e militares, mas logo de seguida foram surgindo aplicações comerciais e profissionais. Assim, faz sentido pensar de que forma estes veículos podem ter impacto nos sistemas de energia.

Um drone é uma aeronave pilotada remotamente, ou seja, uma aeronave que se destina a operar sem um piloto a bordo, podendo operar autonomamente através de rotas pré-programadas ou remotamente de um ponto de controlo no solo. São então aeronaves de pequenas dimensões e por isso com aplicações limitadas, geralmente para levantamento aéreo [22].

Desta forma surge a oportunidade de integrar os UAV na inspeção da vasta rede elétrica nacional. Estas inspeções, como referido anteriormente, são essencialmente de carácter visual, ou seja, são compatíveis com a principal funcionalidade dos UAV. A aplicação dos UAV na inspeção dos diversos ativos da rede implica uma maior segurança das equipas de

inspeções, evita-se as deslocações de helicópteros e a locais remotos de difícil acesso, reduzindo assim os custos de operação e permitindo uma maior frequência de monitorização da rede.

Assim, neste capítulo pretende-se esclarecer as questões técnicas relativas aos UAV, nomeadamente as questões regulamentares aplicáveis, o levantamento do estado da arte das aeronaves e das respetivas tecnologias que os integram de forma a analisar as aplicações possíveis e os benefícios que estes proporcionam.

3.1. REGULAMENTAÇÃO

O aparecimento dos UAV impõe regulamentações que condicionam a liberdade das operações, especialmente por estes serem ferramentas recentes que operam num espaço aéreo geralmente controlado. Aqui será identificada a legislação harmonizada que habilita as operações seguras dos UAV. Esta inclui:

- O Regulamento nº 1093/2016 que define as condições genéricas das operações UAV;
- A obrigatoriedade de registo de todos os objetos intervenientes nas operações e de um seguro de responsabilidade, registado no Decreto-Lei nº 58/2018;
- A adaptação da norma europeia no Regulamento Executivo 2019/947 onde estão definidas as categorias das operações e as condições para as executar, no âmbito da gestão de risco das mesmas;
- As autorizações para o levantamento aéreo envolvido nas inspeções aéreas, referidas no Decreto-Lei nº 42071.

Nestas legislações identificam-se duas principais entidades reguladoras, a ANAC (Autoridade Nacional de Aviação Civil), na qual compete a gestão do espaço aéreo, e a AAN (Autoridade Aeronáutica Nacional), responsável pela coordenação e execução das atividades de âmbito aeronáutico, nomeadamente na atribuição de autorizações previstas nas legislações.

Tal como as demais aeronaves, os drones estão sujeitos a regulamentos de aviação que limitam as condições de voo de modo a reduzir os riscos de operação. O regulamento nº

1093/2016, de 14 de dezembro, desenvolvido pela ANAC, define as condições gerais de operação dos sistemas de aeronaves civis pilotadas remotamente e elenca um conjunto de regras e obrigações de operação. Este regulamento permite a integração correta e ordenada dos UAV no espaço aéreo, garantindo a segurança da navegação aérea, principalmente das aeronaves tripuladas.

No âmbito deste regulamento, os pilotos devidamente formados têm a liberdade para realizar voos diurnos até uma altura de 120 m, desde que o façam a uma distância segura de pessoas e bens, cedendo prioridade às aeronaves pilotadas. Os operadores devem garantir que a aeronave e o sistema, tal como o estado físico e mental do piloto, estão nas condições adequadas à operação, nomeadamente a obrigatoriedade permanente de luzes de identificação, de modo a ser sempre possível o contacto visual, e o estabelecimento de comunicações bilaterais com o UAV [23].

Fora a situação descrita, os restantes voos carecem autorização da ANAC, tais como os voos noturnos, sobre concentração de pessoas e a altitudes superiores a 120 metros (exceto no interior de uma CTR (Zona de Controlo Aéreo), onde estão limitados à altura vertical definida pela CTR e exceto em zonas pré-definidas, onde estão limitados à altura vertical máxima permitida nessa zona), as operações BVLOS (Beyond Visual Line of Sight) e com UAV cujo peso operacional seja superior a 25 kg [23].

Por fim, a ANAC fornece informações das áreas de proteção operacional dos aeroportos. Assim, a figura 28 delimita as áreas restritas aos voos próximas de infraestruturas aeroportuárias de Portugal continental, cuja operação nesses locais também requer autorização prévia [24].

Os voos que não cumpram com os requisitos descritos são sujeitos a penalizações correspondentes ao Decreto-Lei nº 10/2004, de 9 de janeiro, que define o regime aplicável às contraordenações aeronáuticas civis.

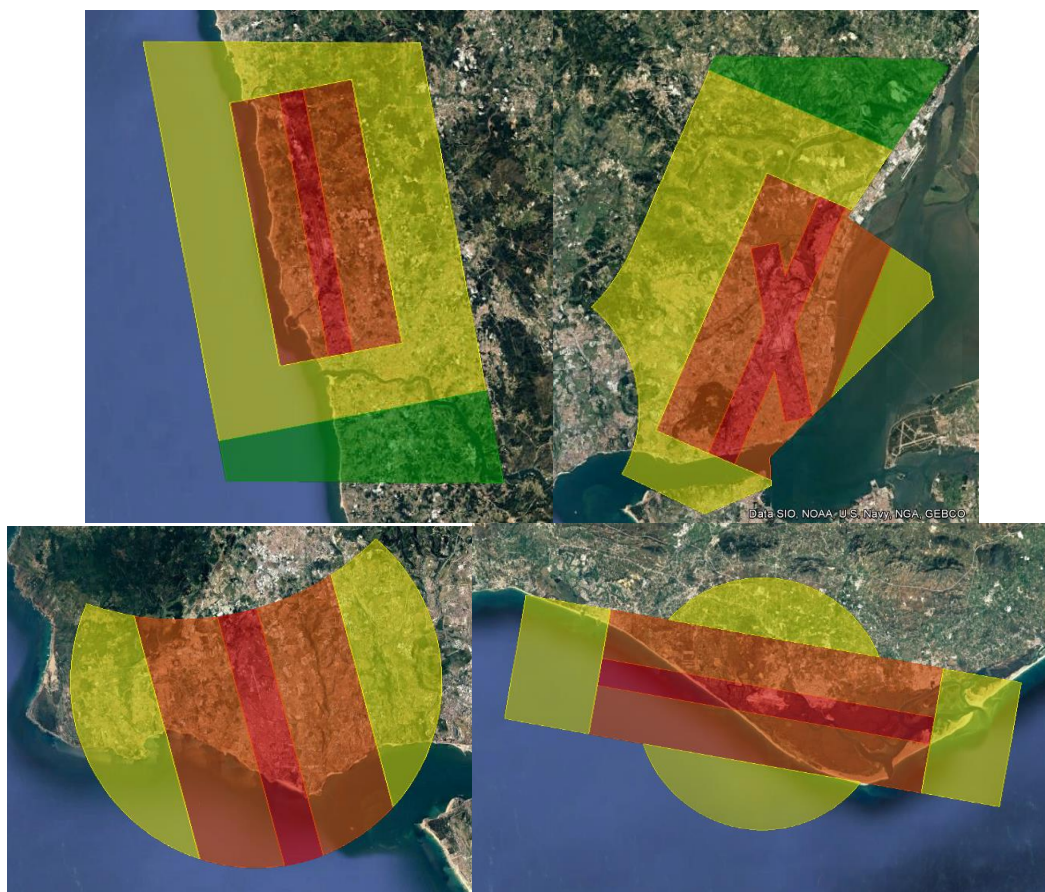


Figura 28 – Zonas de Tráfego de Aeródromo: a) b) c) d). Alturas máximas representadas: Verde – 80m; Amarelo – 60m; Laranja – 30m; Vermelho – Área Proibida [24]

Certas operações, em função do tipo de UAV e da prática a que se destina, estão vinculadas sobre um regime obrigatório de registo e de seguro de responsabilidade civil.

Assim, o Decreto-Lei nº 58/2018, de 23 de julho, define que os UAV com peso superior a 250 gramas são de registo obrigatório e os operadores de UAV com peso superior a 900 gramas devem possuir um seguro obrigatório de responsabilidade civil. Cada UAV apenas pode ser operado se o respetivo piloto estiver validamente registado junto da ANAC, pois os registos do UAV e do seguro de responsabilidade civil são feitos a requerimento do operador.

Neste âmbito, os operadores que não cumpram com as normas de registo estão sujeitos a coimas correspondentes ao tipo de contraordenação.

O levantamento aéreo, isto é, as atividades de recolha de imagens, som ou de outros dados com recurso a equipamento instalado numa plataforma aérea, carece de autorização por parte da AAN. Assim, todas as aeronaves com capacidade de recolha de informação,

tripuladas ou não tripuladas, enquadradas nesta definição, estão abrangidas pelo Decreto-Lei nº 42071, regulamentado pela Portaria nº 17568, esta alterada pela Portaria nº 358/2000 [25].

O Regulamento Executivo 2019-947 traduz essencialmente as normas internacionais em vigor e estabelece disposições pormenorizadas das operações de sistemas de UAV, dos pilotos remotos e das organizações envolvidas. O âmbito deste regulamento insere-se na gestão de risco associado às operações de UAV e define as condições de segurança de operação.

Para isso, a norma europeia divide as operações em três principais categorias: aberta, específica e certificada. A primeira é uma categoria onde as operações não necessitam de autorização prévia depois de considerados os riscos envolvidos. As operações “específicas” requerem autorização das entidades competentes, levando a cabo as medidas de mitigação de risco previamente desenvolvidas. A categoria “certificada”, a operação requer certificação do UAV, a formação do piloto remoto e um operador autorizado pelas autoridades competentes [26].

Este regulamento propõe uma estrutura para operações seguras permitindo a este mercado espaço para inovação e crescimento. Considera os riscos que os UAV apresentam aos obstáculos do solo e às restantes aeronaves e também as questões de privacidade e proteção de dados. Define requisitos técnicos e operacionais, tais como a identificação remota dos UAV e sistemas de localização geográfica, respetivamente [27].

Por fim, o Regulamento Executivo 2019-945 define os requisitos mínimos destinados aos fabricantes, importadores e distribuidores de UAV de modo a estes cumprirem com as condições de risco e obterem a marcação CE. Para isso, os UAV são divididos em classes (C1, C2, C3 e C4) de modo a serem nomeados em função dos requisitos de cada classe [28].

Com isto, os Regulamentos e Decretos-Lei mencionados permitem harmonizar a legislação nacional relativa às operações com UAV e conciliar com as normas europeias existentes. Para operações no âmbito das inspeções dos ativos da rede elétrica nacional, é essencial ter em conta a regulamentação apresentada.

3.2. DRONES PROFISSIONAIS

Os UAV podem ter diversas características e incorporar várias tecnologias, dependendo da utilidade pretendida. Diferenciam-se principalmente pelo tipo de voo, determinado pela configuração da asa: fixa ou rotativa.

Estes enquadram-se nas diversas áreas profissionais, nomeadamente na agricultura e mineração, conservação da vida animal e florestal, construção civil e planeamento urbano, na gestão de desastres, entre outros. São vastas as aplicações possíveis, desde que o UAV esteja equipado com as devidas tecnologias. Por exemplo, no setor energético, a inspeção de parques fotovoltaicos recorrendo a UAV equipados com sensores termográficos permite analisar o estado das células fotovoltaicas e verificar a existência de pontos quentes (exemplo na figura 29) de forma mais rápida e eficiente do que os métodos anteriormente utilizados. Com este método, as inspeções levam apenas 10 minutos/MW e poupam até 1200€/MW, sendo que áreas fotovoltaicas maiores apresentam reduções ainda mais relevantes. Isto pois, neste caso, a inspeção com UAV custa 46% menos do que a inspeção manual do mesmo parque fotovoltaico [29].

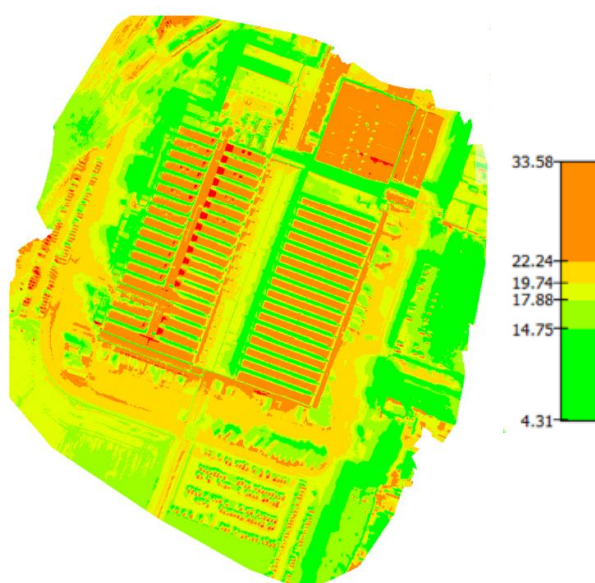


Figura 29 – Resultado de uma inspeção termográfica num parque fotovoltaico [30]

3.2.1. ASA FIXA

Os UAV de asa fixa são similares aos aviões, na aerodinâmica de voo, visto que estes não permitem estabilizar no ar, mas planam a partir do fluxo de ar. Assim, são veículos que permitem percorrer longas distâncias em curtos espaços de tempo. Dentro dos UAV, estes apresentam grande autonomia, sendo indicados para aplicações em ativos lineares, como em estudos topográficos ou na inspeção de extensas linhas elétricas.

São constituídos por um corpo central com duas asas e, geralmente, têm apenas uma única hélice. Durante o voo, a sustentação gerada pelo fluxo de ar compensa o seu peso permitindo que UAV permaneça em voo. Assim, esta tipologia apenas precisa de energia para se mover na horizontal e não para se manter no ar, motivo da sua maior autonomia. No entanto, a vantagem desta autonomia vem diretamente da sua envergadura e área da superfície, que por sua vez são complexos de armazenar [31]. Na figura 30 é apresentada uma das principais soluções de asa fixa do mercado, o Delair UX11.



Figura 30 – Delair UX11: UAV de asa fixa [34]

A decolagem é feita por uma catapulta, arremessando o UAV de uma estrutura com um elástico. Em certos casos, os UAV já podem ser arremessados manualmente. A aterragem pode ser através de paraquedas ou de forma linear, descendo e desacelerando progressivamente até parar por completo. Esta situação será mais complexa, mas certos estudos demonstram a precisão deste tipo de aterragem, como exemplificado na figura 31.



Figura 31 – Testes de precisão de aterragem automática dentro de um raio de 5 metros [32]

Dentro desta tipologia existem diversas gamas de UAV, em função das suas características, nomeadamente de autonomia e alcance de voo, como consequência uma diferença acentuada no investimento de aquisição inicial. Assim, na tabela 2 são apresentados três dos sistemas mais relevantes e eficientes do mercado.

Tabela 2 – UAV Asa Fixa e Principais Características [33]–[35]

	Sensefly eBee X	UX11	DT26
Autonomia	90 minutos	60 minutos	135 minutos
Alcance de Voo	47 km	53 km	110 km
Peso	1,4 kg	1,5 kg	18,5 kg
Velocidade de Voo	40 km/h	54 km/h	60 km/h
Payload	Sensor Ótico	Sensor Ótico	Sensor Ótico e LiDAR
Comunicação	Rádio	3G/4G e rádio	3G/4G e rádio

3.2.2. ASA ROTATIVA

Ao contrário dos anteriores, os UAV de asa rotativa são similares aos helicópteros pois permitem fixar-se no ar durante o voo. Um exemplo deste design é apresentado na figura 32. No entanto, a sua performance de voo é inferior, logo são frequentemente utilizados em inspeções locais e em inspeções que requerem maior detalhe pois permitem aproximarem-se dos ativos, obtendo uma maior precisão nas amostras obtidas, devido à sua estabilidade de voo.



Figura 32 – DJI M210 RTK: UAV de asa rotativa (fonte própria)

Em função do número de hélices, os mais comuns são UAV que possuem quatro (quadricópteros), seis (hexacópteros) ou oito (octacópteros) rotores. Este tipo de UAV são controlados variando a velocidade relativa de cada hélice, permitindo assim uma gama de movimentos superior aos de asa fixa. A descolagem e aterragem destes UAV é simples, designada “Vertical Take-Off and Landing (VTOL)” [31].

Equipados com a mesma instrumentação dos helicópteros aquando as inspeções, estes oferecem um produto final semelhante ao dos helicópteros. Esta tipologia suporta payloads com cargas mais elevadas, ou seja, permite adicionar mais sensores e obter mais dados em cada missão. No entanto, juntamente com o facto de que é necessário alimentar cada rotor da aeronave, quanto maior for o payload, menor será a autonomia de cada missão.

Assim, estes UAV são mais flexíveis em inspeções localizadas, mas também mais condicionados em cada missão. A DJI, uma das principais entidades que desenvolve UAV com este design, apresentou uma nova solução onde as principais características, como a autonomia, o alcance de voo e os sistemas de segurança do novo modelo revolucionam as operações limitadas pela performance dos restantes modelos desenvolvidos até à data. Estas características assemelham-se agora às soluções de asa fixa, mesmo que com utilidades distintas, e destacam o avanço tecnológico deste mercado, comparado na tabela 3 [36].

De momento, esta tipologia é a que apresenta mais aplicações e os UAV existentes no mercado são considerados os melhores e mais eficientes. Assim, na tabela 3 estão apresentados os exemplos de UAV de asa rotativa mais relevantes do mercado [37].

Tabela 3 – UAV Asa Rotativa e Principais Características [36], [38]

	DJI M600	DJI M210 RTK	DJI M300 RTK
Autonomia	18 minutos	33 minutos	55 minutos
Peso	10 kg	4,7 kg	7 kg
Velocidade de Voo	65 km/h	73,8 km/h	82,8 km/h
Payload	Sensor Ótico/Termográfico	Dual gimbal	Até três sensores (triple gimbal)
Comunicação	Rádio	Rádio	Rádio

3.3. SISTEMAS DE CONTROLO DE AVIAÇÃO - AVIONICS

Um UAV, quer seja controlado manualmente ou através de rotas pré-programadas, deve nele ter incorporado vários sistemas eletrónicos que permitem controlar as diversas variáveis presentes num voo, designados "avionics". Assim, estes sistemas estão tipicamente presentes em todas as aeronaves, visto que permitem monitorizar e controlar o posicionamento, a altitude e a velocidade do voo.

Com isto, um UAS (Unmanned Aerial System) é geralmente constituído pelo veículo e os seus componentes eletrónicos de navegação e controlo, pela estação de controlo (Ground Control Station - GCS) e um sistema de comunicação entre o UAV e o GCS.

3.3.1. SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO

Na base da navegação aérea dos UAV estão dois sistemas que se complementam e permitem alcançar a melhor precisão de posicionamento para um voo mais rigoroso e estável.

Estes sistemas são o GPS (Global Positioning System) e o INS (Inertial Navigation System). O GPS é um sistema de navegação que recebe frequências rádio provenientes de constelações de satélites que determinam a posição, a velocidade e o tempo de um determinado veículo em cada momento. O acesso ao GPS está globalmente disponível e com acesso a várias gamas de frequência, no entanto, é necessário um número mínimo de satélites em linha de vista pois os sinais provenientes dos satélites não penetram obstáculos como montanhas ou edifícios, sendo assim propício a erros de posicionamento e apenas obtêm precisões de posicionamento próximas de 5 metros [39]. Por isso, os UAV equipados somente com GPS são principalmente utilizados para usos recreativos, aplicações que não necessitem de sistemas de navegação complexos.

O INS fornece informação da aceleração linear do UAV nos 3 eixos e calcula a sua posição atual em função da posição anterior baseando-se nas características das grandezas medida pelos sensores de movimento e rotação. Ao contrário do GPS, o INS não é influenciado por referências externas, mas depende de uma referência anterior.

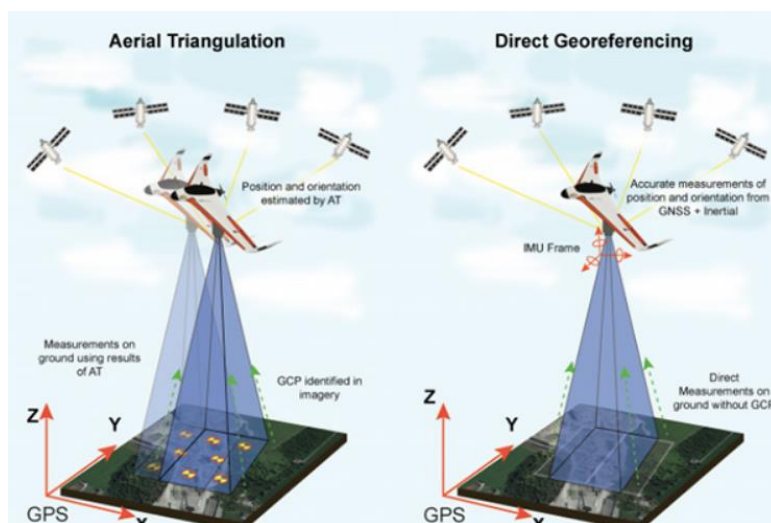


Figura 33 – Correção posicional através do INS [41]

Este dispositivo é essencialmente constituído por um IMU (Inertial Measuring Unit) que consiste em acelerómetros, magnetómetros e giroscópios. Estes mecanismos determinam a aceleração e a velocidade angular de um veículo de modo a extrapolar a posição, orientação e velocidade relativa à posição anterior [40].

Assim, o INS permite determinar precisamente o movimento do UAV e complementar e corrigir as coordenadas fornecidas pelo GPS [41], como ilustrado na figura 33. As coordenadas processadas pelo sistema GPS e a informação da orientação do IMU tornam a navegação mais precisa e segura, facilitando as operações com voos mais estáveis e as operações BVLOS pois o UAV é capaz de seguir mais precisamente as rotas programadas.

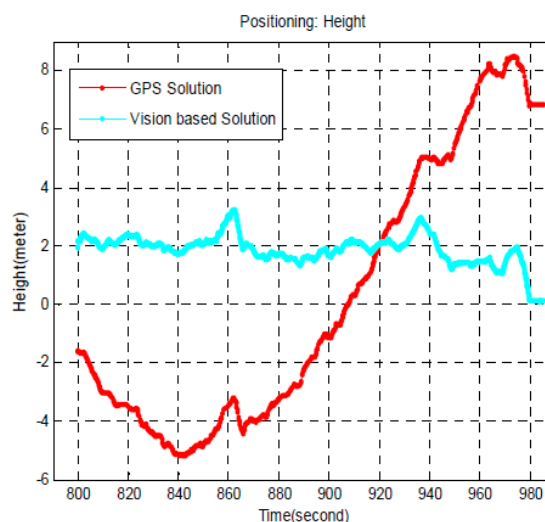


Figura 34 – Comparação da precisão posicional entre GPS e sistemas de navegação integrados [42]

Estes sistemas integrados devem estar presentes na maioria das aplicações.

A informação da distância vertical e do movimento relativo ao solo é fundamental para a navegação automática de um UAV, no entanto estes sistemas não permitem obter essa informação. Pelo contrário, sensores visuais colocados nas várias direções do UAV detetam a área ao seu redor. Estes são geralmente utilizados para fins de controlo da aeronave, como será introduzido em diante, mas também informam sobre a posição vertical do UAV. Assim as características distintas de um sistema integrado com GPS, INS e sensores visuais complementam-se e otimizam a navegação aérea [42], como

demonstrado na figura 34, onde se verifica a estabilidade vertical de um UAV com e sem sensores visuais (a azul e vermelho, respetivamente) desbloqueada pelos sensores visuais.

Os dados provenientes dos satélites (GPS) são propensos a erros derivados de atraso atmosférico e a falhas de conexão, como referido anteriormente. Para compensar estes erros, certos sistemas incluem tecnologias de correção de posicionamento que melhoram a precisão dos dados do GPS e o detalhe do levantamento aéreo.

Estes sistemas de correção GPS, designados RTK (Real Time Kinematic) ou PPK (Post Processing Kinematic), processam os dados geográficos recolhidos durante um voo e comparam-nos com a referência de uma estação remota. A referência, que também sofre com as mesmas falhas de GPS, permite corrigir diferencialmente estes dados e obter mais precisamente a trajetória geográfica, sendo esta informação crucial para o processamento das imagens aéreas [43].

Durante um voo, o UAV quando incorporado com um recetor GPS RTK recebe informação dos satélites e de uma referência RTK no solo (figura 35), permitindo corrigir a localização aérea em tempo real. A correção dos dados dos satélites tem em conta a informação proveniente da referência no solo, reduzindo a grandeza da precisão de posicionamento de metros para centímetros [44].



Figura 35 – Sistema RTK, desenvolvido pela DJI para o modelo Matrice 200 (fonte própria)

Para isso é necessária uma comunicação constante entre os vários intervenientes (UAV, satélites, referência RTK e GCS). No entanto, da mesma forma que o UAV perde a ligação GPS, os obstáculos podem interromper o sinal entre qualquer uma destas ligações. Com isto, pelo menos as ligações terrestres com o UAV devem manter-se ininterruptas para se obter a mesma precisão que as tecnologias PPK [44].

Visto que com a tecnologia PPK não é necessário manter a ligação entre o GCS e o UAV, este método é mais viável do que o anterior [44]. Entre as duas tecnologias, o que difere é o processamento das correções do GPS. Na tecnologia RTK, esse processamento é feito em tempo real. Por outro lado, o processamento do PPK é feito após a missão [45].

Tanto o UAV e a referência no solo recolhem os dados GPS, mas neste caso armazenam-nos para que os dados sejam cruzados e processados posteriormente. Assim, os resultados obtidos entre o PPK e o RTK serão os mesmos, pois têm-se em conta os mesmos dados, no entanto o RTK é mais propício ao aparecimento de lacunas nos dados devido às possíveis interrupções de comunicação [44].

A figura 36 compara os métodos de ambas as tecnologias, despertando para a diminuta quantidade de ligações do PPK face ao RTK.

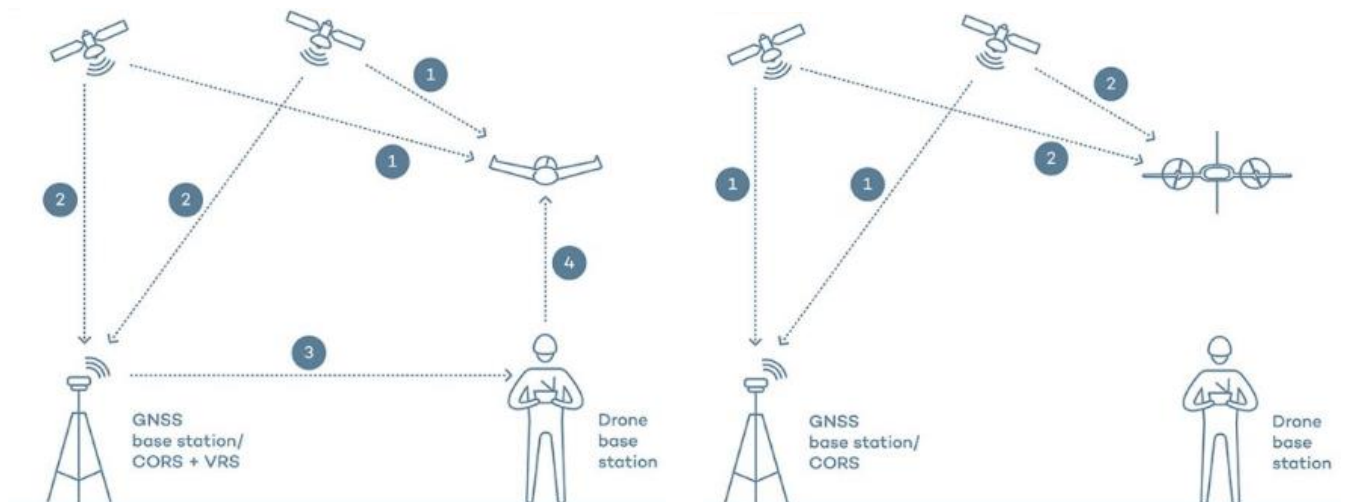


Figura 36 – Comparação entre o sistema de correção RTK (esquerda) e PPK (direita) [44]

A precisão que estas tecnologias oferecem são fundamentais para um processamento adequado do levantamento aéreo, sendo a georreferência das imagens uma das variáveis de processamento nomeadamente em mapeamento e medições de distâncias. Como se pode

averiguar pela tabela 4 e correspondente figura 37, as precisões georreferenciais obtidas, neste caso por RTK, são consideráveis face a soluções sem correções georreferenciais [46], [47].

Tabela 4 – Precisão Posicional do Sistema RTK [47]

	RTK (cm)	GPS (cm)
Longitude	12,07	87,57
Latitude	7,34	98,58

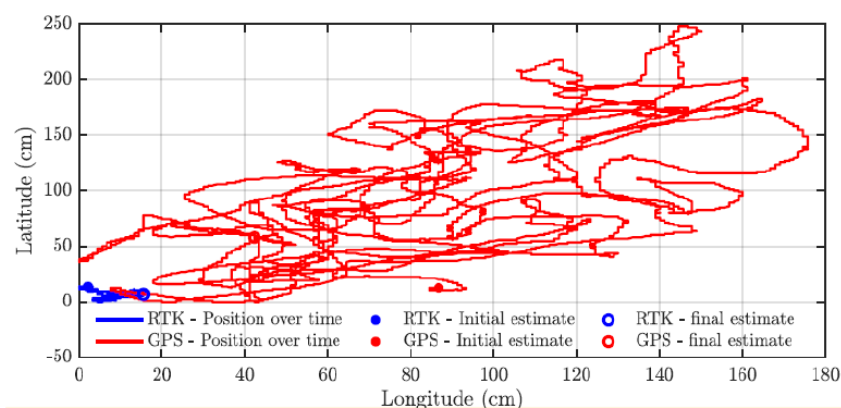


Figura 37 – Precisão posicional do sistema RTK [47]

3.3.2. SISTEMAS DE CONTROLO

Para operações seguras, os UAS devem estar preparados para realizar um número mínimo de comunicações de modo a reduzir os riscos associados aos voos. Nestes riscos estão incluídos nomeadamente interferências aéreas (aeronaves na imediação) e interferências físicas (obstáculos ou eletromagnetismo).

Assim, uma primeira ligação de comunicação que deve ser assegurada será entre o controlo de tráfego aéreo. Estas comunicações são críticas para a gestão segura do tráfego aéreo, especialmente em zonas de espaço aéreo partilhado com grande densidade de aeronaves [48], [49].

Certos sistemas UAV incluem tecnologias de vigilância, designadas ADS-B Receiver, com a principal funcionalidade de alertar para aeronaves nas imediações e avisar as mesmas da sua presença. Estas tecnologias são utilizadas em aeronaves pilotadas ou não pilotadas,

sendo então de natureza obrigatória nos UAV. Na figura 38 está exemplificado um alerta para a presença de tráfego aéreo nas imediações.

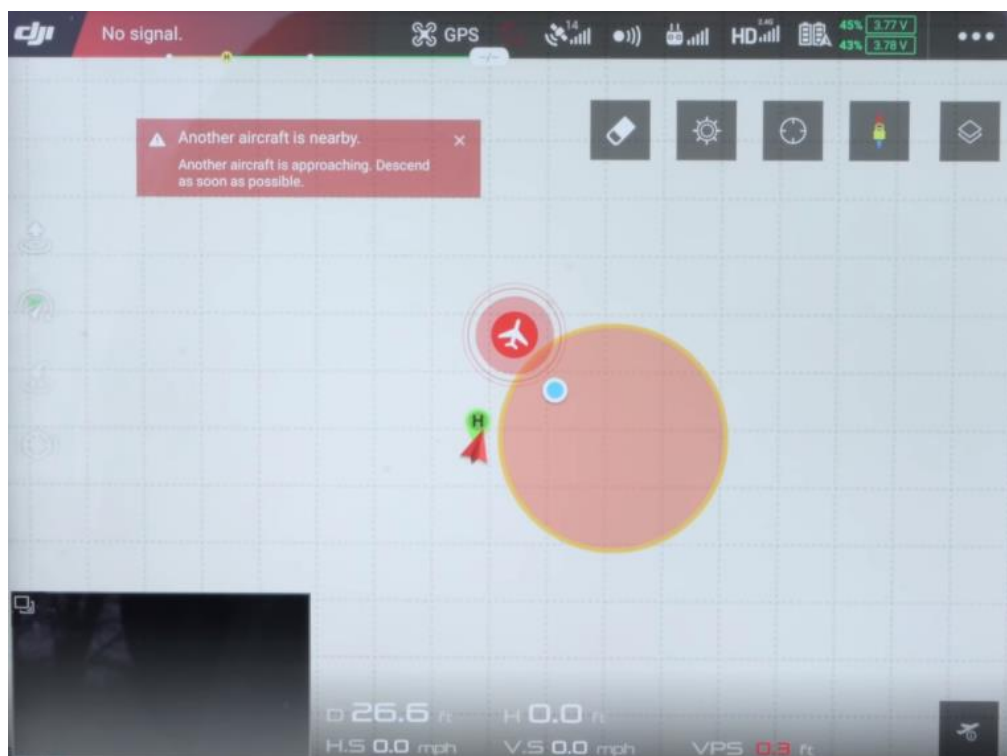


Figura 38 – Interface de um GCS – Alertas de interferências [38]

De modo a reduzir os riscos associados ao tráfego aéreo, como se pode observar no aviso acima, em certos casos é aconselhável abortar a operação ou por vezes os UAV são mesmo impedidos de decolar. Para além do risco de perda total do UAV em caso de colisão estão em causa riscos de segurança humana que não são geralmente associados às operações com UAV. Assim, uma vez mais a comunicação com o controlo do espaço aéreo deve ser garantida no âmbito da segurança das operações.

Para além do espaço aéreo, em determinadas operações os UAV correm risco de colidir com eventuais obstáculos. O princípio designado "see and avoid" nas aeronaves pilotadas é o principal mecanismo para evitar colisões. Assim, adaptado à tecnologia UAV, aparece o princípio "sense and avoid" com o mesmo objetivo de evitar colisões com edifícios e outras infraestruturas [49]. No entanto, tal como a designação indica, este princípio foi também adaptado para que sejam os diversos sensores acoplados no UAV a alertar para estas interferências.

Este princípio é então baseado na informação proveniente dos sistemas de sensores integrados e processada por algoritmos de fusão dos dados dos sensores, sensores estes que devem estar integrados nas seis direções do UAV de modo a detetarem os obstáculos ao seu redor [49].

A fusão dos dados destes sensores implica uma melhor detecção dos obstáculos, visto que cada sensor sozinho não teria a capacidade de obter toda a informação ao seu redor, mas a informação combinada de vários sensores de diferentes tecnologias torna o sistema mais robusto, obtendo uma descrição completa do ambiente aéreo que geralmente está em constante mudança. Estes sistemas verificam-se menos em soluções de asa fixa pois estes operam geralmente sobre operações pré-programadas, cujas trajetórias são anteriormente definidas e já têm em conta a presença de obstáculos, enquanto que as operações localizadas dos UAV de asa rotativa possuem estes sensores anti colisão, melhorando a estabilidade de voo e apoiando a navegação remota.



Figura 39 – Distribuição dos sensores anti colisão [36]

As tecnologias utilizadas para efeitos de detecção de obstáculos são tipicamente sensores visuais, sensores laser (LiDAR) ou infravermelhos e sensores ultrassom [48], como exemplificado na solução presente na figura 39. Os sensores óticos permitem ao piloto remoto ter sempre noção dos obstáculos na sua trajetória, enquanto que os sensores infravermelhos e ultrassom detetam infraestruturas ao redor do UAV.

As tecnologias dos sensores laser e ultrassom têm princípios de funcionamento semelhantes, na medida em que ambos emitem ondas de diferentes frequências e determinam a distância aos obstáculos através da reflexão dessas ondas. Por outro lado, os

sensores ultrassom têm menos alcance e não determinam o tamanho ou a forma dos obstáculos, por isso são colocados na direção descendente para permitirem uma aterragem mais suave do UAV.

Outro dos aspetos importantes das tecnologias sensoriais de detecção de interferências é a detecção de campos eletromagnéticos que podem interferir com o bom funcionamento do UAV e consequentemente aumentam o risco das operações. Isto é mais evidente em linhas MAT de 400 kV, onde os campos eletromagnéticos são mais fortes e os sistemas de controlo limitam a aproximação do UAV ao ativo pela perda de comunicação que surge das interferências eletromagnéticas.

Todos estes dados, desde a posição do UAV proveniente do GPS até às interferências detetadas pelos sensores, devem ser comunicados ao piloto remoto, que faz parte do Ground Control Station.

Assim, o GCS permite, através dos sistemas de controlo mencionados neste capítulo, monitorizar e controlar o UAV. Os dados dos sensores são enviados através de uma ligação descendente e os controlos enviados para o UAV por uma ligação ascendente após processados os dados da ligação descendente, designados por telemetria, que consiste no estado atual do voo e podem incluir a localização GPS, a orientação do UAV, as interferências detetadas, entre outros dados necessários para uma operação estável e segura [49].

As frequências destas ligações estão geralmente na ordem dos 2.4 GHz [49], [50]. As ligações funcionam num largo espectro de frequências, desde 430 MHz a 5.8 GHz, no entanto, frequências mais baixas (entre 430 e 900 MHz) não transmitem imagem de vídeo e são suscetíveis a interferências mais comuns, apesar de terem mais alcance e sofrerem menos distorção, mesmo em condições atmosféricas desfavoráveis [48].

As frequências das ligações dos UAS são então suscetíveis às mais diversas interferências e condições atmosféricas, mas permitem a transmissão de vídeo e de telemetria essencial no controlo do UAV [49], [50].

Estas ligações mantém a coordenação entre o UAV e o GCS. A principal função do GCS é transmitir os comandos ao UAV em função da informação enviada (telemetria) e apresentada na interface do GCS.

Os sistemas de controlo asseguram assim operações seguras, reduzindo os riscos associados através da precisão de posicionamento, da capacidade anti colisão e da deteção de interferências físicas e aéreas. Com isto, a maioria dos sistemas potenciam uma maior automatização das operações, sendo possível definir vários modos de voo como [51]:

- Bloqueio de Altitude/GPS – Para inspeções pormenorizadas de infraestruturas, onde o sistema permite estabilizar a sua posição por motivos de segurança ou para capturar imagens sem distorção devido ao movimento do UAV.
- Voo autónomo – Os controlos de navegação são automáticos e a trajetória programada antes do voo, ao contrário do voo manual onde o operador fornece sempre a informação para o onde o UAV se deve deslocar.
- Return-to-Home – Em caso de qualquer emergência, o UAV tem a capacidade de regressar automaticamente ao local de descolagem, sem embater em obstáculos devido ao sistema de anti colisão e à precisão dos sistemas de navegação (GPS/IMU) que influenciam os principais modos de voo aqui apresentados.

3.4. INSTRUMENTAÇÃO

À parte dos sistemas descritos anteriormente, nos UAV deve ser acoplada determinada instrumentação que lhes permite realizar as suas funções predestinadas. Esta instrumentação, designada de “payload”, é geralmente composta por um grupo de sensores que inclui sensores óticos ou térmicos. Dependendo da missão e do veículo, o payload de uma aeronave pode incluir carga, passageiros, equipas de bordo ou sensores. Sensores óticos são os casos mais comuns nos UAV com o principal objetivo de capturar grandes distâncias e áreas e ao mesmo tempo conseguir um payload pequeno, leve e com baixos consumos. No fundo, o payload é a capacidade de carga do UAV e as suas restrições correspondem ao peso e tamanho máximo permitido de forma a que essa carga não afete significativamente a autonomia e alcance da missão [52]. No entanto, quanto maior for a capacidade de carga do payload, maior será a flexibilidade das missões pois assim é lhe permitido adicionar diversas tecnologias e realizar diferentes levantamentos em apenas um voo.

A maioria dos UAS são equipados com os respetivos payloads dos próprios fabricantes, no entanto o operador pode adicionar a instrumentação mais conveniente para a missão que

realiza [53]. Assim, certos UAV incluem a opção de “open payload”, que permite ao utilizador personalizar o UAV para operações específicas [35], isto é, um open payload é um payload vazio que permite acoplar outros sensores dentro de um limite estrutural e eletrónico.

De forma a estabilizar a instrumentação do payload, geralmente são instalados mecanismos de suporte que permitem a rotação dos sensores num único eixo, designados como “gimbal”. Um gimbal torna o sensor independente do movimento do UAV, estabilizando assim a imagem mesmo que este se mova em qualquer direção [54].

Com isto, este capítulo irá ilustrar o princípio de funcionamento dos *payloads* mais frequentemente instalados no âmbito das inspeções dos ativos da rede e as respetivas gamas existentes no mercado.

3.4.1. FOTOGRAMETRIA E INSPEÇÃO DE PORMENOR

A fotogrametria consiste em obter informações acerca das propriedades dos objetos, nomeadamente distâncias e volumes, a partir da interpretação da sobreposição das imagens obtidas numa missão. Esta interpretação é realizada posteriormente recorrendo a softwares que permitem fazer o processamento e sobreposição das imagens e obter uma interpretação 2D ou 3D da posição de cada ponto das imagens. A instrumentação consiste num simples sensor ótico capaz de capturar imagens para serem posteriormente processadas em modelos 3D. Porém, a qualidade do processamento depende da resolução/qualidade da lente do sensor.



Figura 40 - Processamento Fotogramétrico (fonte: REN)

Recorre-se à fotogrametria quando se necessita de realizar a topografia de determinada área ou obter medições de distâncias a partir da interpretação 3D. Na figura 40 está representado o processamento do levantamento aéreo fotogramétrico. A sobreposição das imagens 2D permite obter um modelo digital 3D segundo a elevação do local.

A tecnologia de fotogrametria é uma tecnologia madura e amplamente utilizada, no entanto, a recente indústria dos UAV promoveu uma aplicação inovadora de fotogrametria aérea. A câmara é instalada no UAV, apontada verticalmente em direção ao solo de modo a capturar múltiplas imagens do terreno. Para uma fotogrametria bem-sucedida é necessária uma sobreposição lateral e longitudinal de cerca 70% [55], aumentando assim a precisão obtida nos softwares de processamento .

Devido à ampla utilização de fotogrametria, existem várias tecnologias já maduras no mercado. Quando aplicadas em UAV, a DJI apresenta sensores óticos de alta qualidade que permite obter imagens de alta resolução, com grandes capacidades de zoom, indicadas não só para inspeção visual pormenorizada como também para o processamento fotogramétrico. Entre os sensores mencionados, na figura 41, destaca-se o DJI Zenmuse X7 com uma resolução de 21 MP e o DJI Zenmuse Z30, com uma mera resolução de 2,13 MP mas com capacidades de 6 vezes zoom ótico e 30 vezes zoom digital [56], [57].



Figura 41 – DJI Zenmuse X7 (esquerda); DJI Zenmuse Z30 (direita) [56], [57]

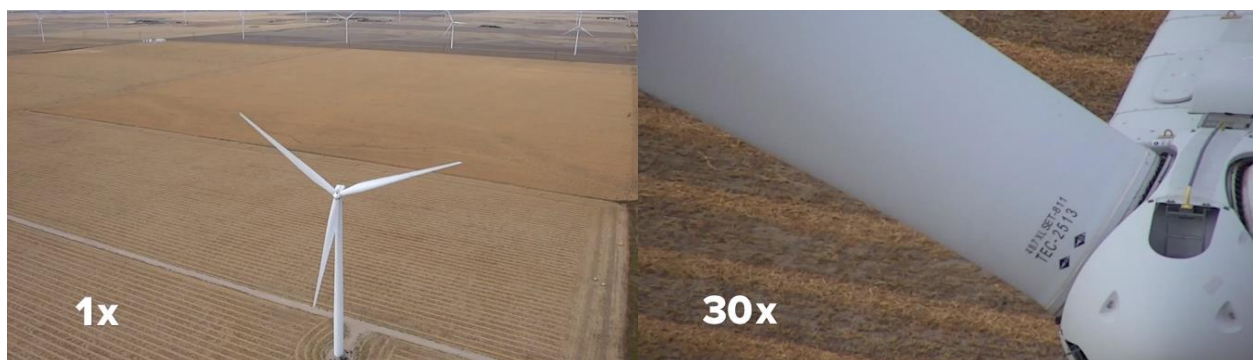


Figura 42 – Capacidade de Zoom do sensor Zenmuse Z30 [57]

Este segundo sensor, embora capaz de realizar capturas para fotogrametria, é indicado especialmente para a realização de inspeções visuais comuns, onde se pretende, por exemplo, avaliar o estado corrosivo dos apoios ou detetar anomalias nas cadeias de isoladores. A sua grande capacidade de zoom permite observar estes detalhes com grande pormenor, mesmo a longas e seguras distâncias dos ativos. Num futuro capítulo serão apresentadas algumas funcionalidades deste sensor nas inspeções de pormenor, embora na figura 42 seja evidente esta capacidade de zoom que promove as inspeções de pormenor.

3.4.2. LiDAR

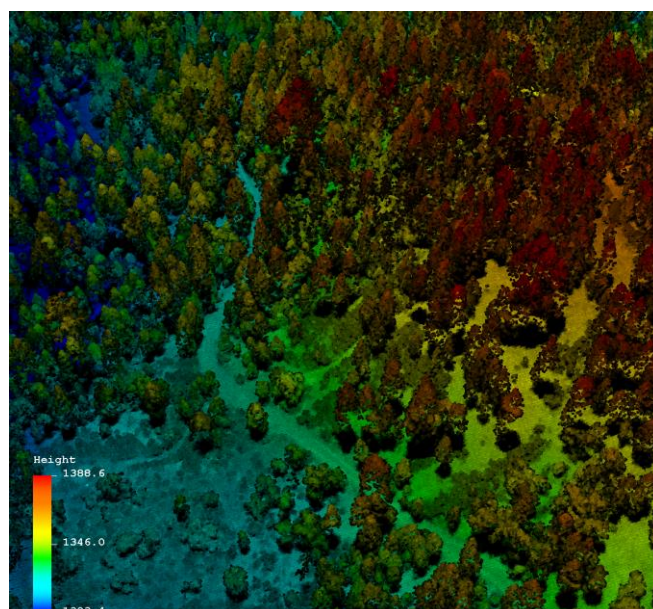


Figura 43 – Exemplo de levantamento LiDAR processado [54]

A tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging) é um método de sensor remoto que utiliza a luz na forma de ondas laser para medir distâncias relativas à terra. Um sistema LiDAR mede o tempo que a luz demora a refletir no solo e a intensidade dessa reflexão, calculando assim a distância percorrida pelo laser e convertendo a distância em elevação. Isto permite então determinar as dimensões dos diferentes obstáculos do solo e obter uma reconstrução digital do terreno baseado nos pontos refletidos, exemplificado na figura 43 [58].

Os sistemas LiDAR são constituídos por um laser, um scanner e um receptor GPS especializado.

No âmbito da integração de sistemas LiDAR nos UAV, a RIEGL, uma companhia especializada em sistemas de medição laser, desenvolveu soluções que permitem conciliar estes aspetos. Baseando-se na especializada digitalização laser terrestre e aérea, as soluções desenvolvidas oferecem sistemas LiDAR mais compactos e mais leves do que os tradicionalmente utilizados, de modo a integrarem os UAS. Entre as demais encontram-se o RIEGL VUX-240 e RIEGL miniVUX-1UAV [59], [60], identificados na figura 44.

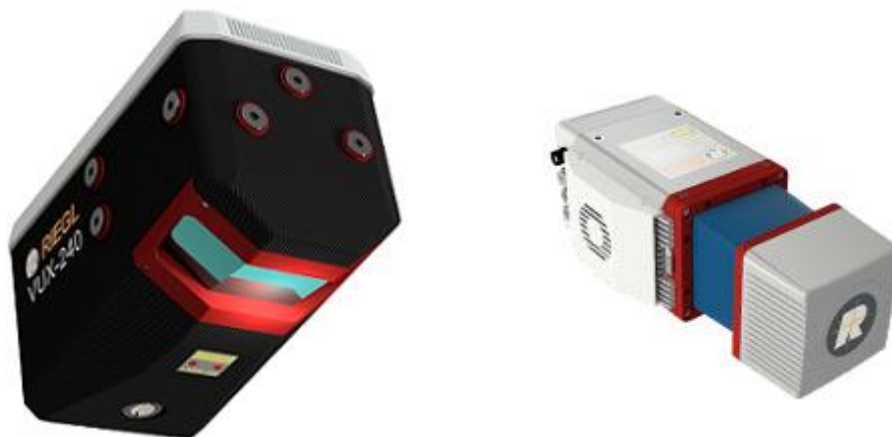


Figura 44 – RIEGL VUX-240 (esquerda); RIEGL miniVUX-1UAV (direita) [59], [60]

Relativamente à fotogrametria, estes dois sistemas apresentam funcionalidades idênticas, no que toca ao mapeamento e medição de distâncias, no entanto cada um enquadra-se de forma específica nestas funcionalidades e de certa forma complementam-se.

Os sistemas LiDAR permitem obter nuvens de pontos que identificam mais precisamente as distâncias dos objetos, enquanto que com a fotogrametria é possível na mesma determinar essas distâncias e ao mesmo tempo obter um modelo 3D mais pormenorizado, incluindo a elevação, textura, forma e cor dos objetos. Os dados obtidos pelo sistema LiDAR requerem uma caracterização prévia de cada ponto, de modo a definir o que cada ponto refletido corresponde na realidade. Assim, após esta caracterização os elementos levantados ganham forma e cor digital, como representado no resultado tradicional da figura 45, enquanto que a fotogrametria apresenta a cor natural capturada pelo sensor ótico.

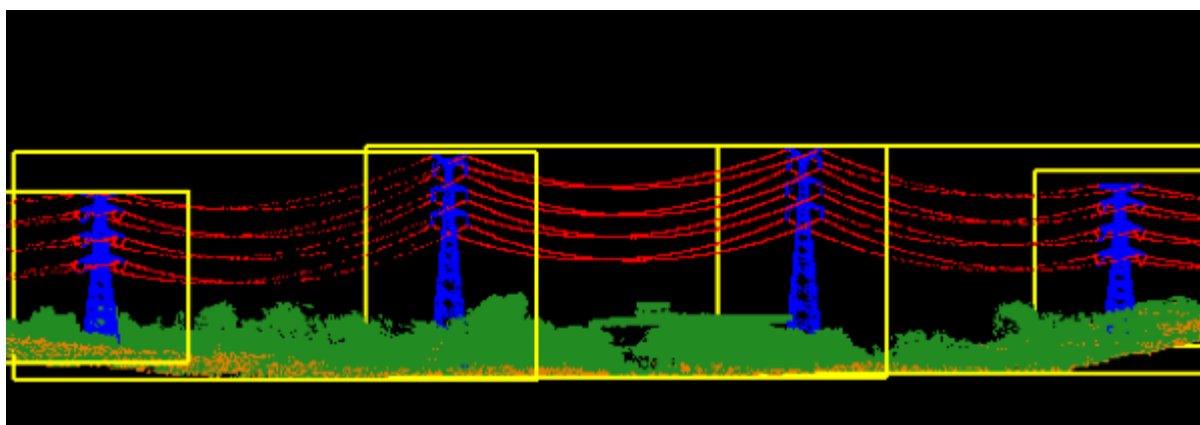


Figura 45 – Resultado da classificação dos pontos após o processamento LiDAR [61]

Porém, a principal diferença entre estes dois sistemas é o preço. O custo de um sistema LiDAR, excluindo a aquisição do UAV, é consideravelmente superior a soluções existentes no mercado que incluem o drone e os sensores óticos que permitem realizar a fotogrametria. No entanto, no caso das inspeções da REN, a solução LiDAR é a mais utilizada pois é mais fácil de adaptar nos helicópteros do que nos UAV e permite retirar melhores conclusões após o processamento do que a fotogrametria [61].

3.4.3. TERMOGRAFIA

A termografia consiste na deteção e medição da temperatura absoluta, da sobre temperatura relativamente a um elemento equivalente não sobreaquecido e de todos os pontos anormalmente quentes que são possíveis indicadores de defeitos num componente ou em ligações, recorrendo a equipamento termográfico adequado.

As inspeções termográficas devem ter em conta as discontinuidades dos condutores (pinças de amarração e suspensão, parafusos, uniões, ligadores, ...) e os isoladores que poderão aquecer devido às correntes de fuga causadas por poluição ou por danos físicos.

Embora os sobreaquecimentos ocorram sobretudo nos apoios de amarração, todos os elementos devem ser observados pois certas anomalias são difíceis de observar visualmente mas são facilmente reveladas por infravermelhos.

Utilizando câmaras termográficas, a termografia consiste na captação da radiação que cada corpo emite na forma de ondas eletromagnéticas quando a uma temperatura superior à temperatura mínima de zero absoluto, convertendo num sinal elétrico que gera imagens onde cada pixel contém informação acerca da temperatura desse ponto [30].

As inspeções termográficas tradicionalmente realizadas por via terrestre e aérea podem agora ser adaptadas aos UAV. Nesta escala, as inspeções passam a ser menos dispendiosas e consomem menos tempo. Em certos casos, a inspeção termográfica pode ser realizada a par da inspeção visual de pormenor quando é possível adicionar mais do que um sensor ao sistema do UAV, como exemplificado na figura 46.

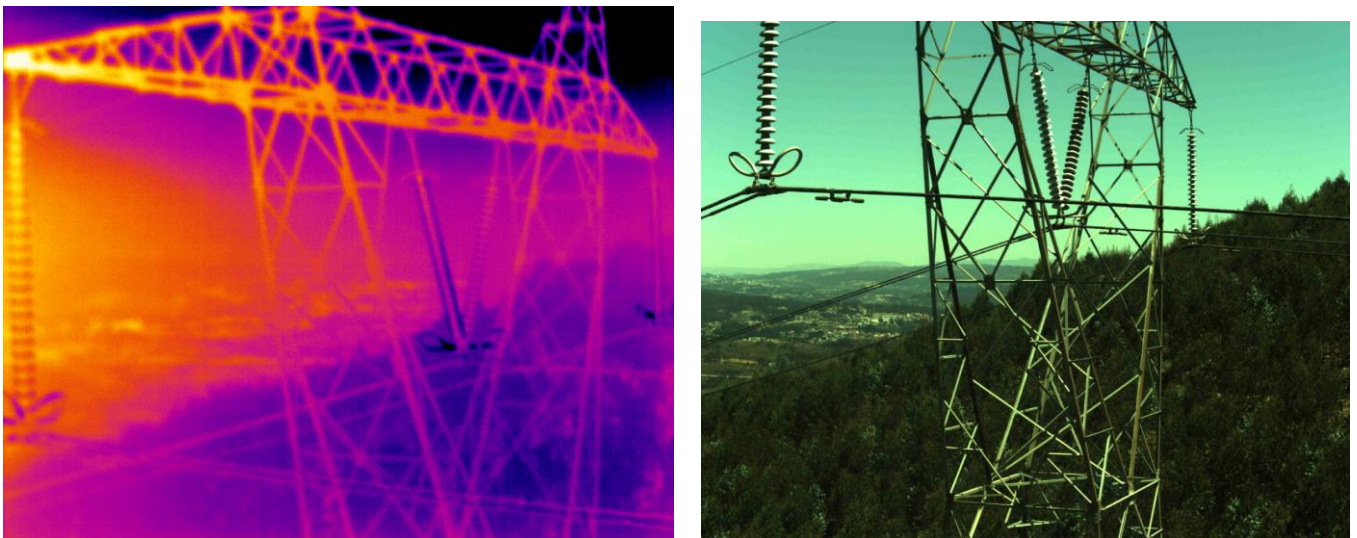


Figura 46 – Resultado termográfico (esquerda) e visual (direita) da inspeção de um mesmo apoio
(fonte: REN)

Neste âmbito, a DJI disponibiliza gimbals que permitem adicionar duas tecnologias de sensores em simultâneo. Em parceria com a FLIR, estas entidades desenvolveram uma série de sensores térmicos capaz de integrar os UAV. Os sensores DJI Zenmuse XT e XT2, na figura 47, conciliam a especialização em medições termográficas da FLIR com os sistemas de estabilização e tecnologia UAV da DJI [62], [63].



Figura 47 – DJI Zenmuse XT e XT2 [62], [63]

No âmbito da evolução destas tecnologias, a DJI avançou com um novo modelo de sensores que combinam as tecnologias termográficas e visuais num só equipamento. Assim, num único payload, com o novo modelo Zenmuse H20 [64], apresentado na figura 48, as operações permitem realizar as duas inspeções em simultâneo. Este novo sensor foi lançado junto do novo modelo de soluções de asa rotativa, o DJI M300, cujas características comuns a estas soluções (autonomia, alcance, etc.) foram superadas, o que sugere que as principais entidades do mercado dos UAV pretendem continuar a evoluir as suas soluções e otimizar o mercado de aplicações profissionais.

Este novo modelo inclui as capacidades de zoom do Zenmuse Z30 e as qualidades termográficas do Zenmuse XT. Para além disto, este sensor também inclui tecnologia laser, que não será tão especializada como sensores mencionados anteriormente, mas em apenas um sensor é possível identificar quatro aplicabilidades distintas num único payload (pormenor, termografia, laser e fotogrametria).



Figura 48 – Zenmuse H20T – Solução com quatro tecnologias de sensores [64]

3.4.4. ULTRAVIOLETA

As inspeções com sensores ultravioleta (UV) permitem localizar zonas onde ocorrem descargas parciais que por sua vez poderão originar o designado efeito coroa. Estas descargas aparecem tipicamente junto dos condutores ou de superfícies isoladas onde, devido à ionização do ar, aparecem novos caminhos condutores e faz com que a energia se dissipe pelos arcos elétricos formados, conduzindo a perdas de potência para o ar ionizado, interferências eletromagnéticas nas proximidades e o aparecimento de ozono (O₃), especialmente destrutivo para os isoladores compósitos, como se verifica na figura 49.



Figura 49 – Danos provocados em isoladores compósitos pelo efeito coroa [66]

As tecnologias de termografia permitem detetar pontos quentes que podem surgir de estados mais avançados do efeito coroa, no entanto, para detetar estas anomalias antes de se tornarem perigosas para os respetivos ativos, as inspeções devem recorrer ao uso de sensores ultravioletas que capturam as ondas de 240 a 280 nm dentro do espectro da luz [65]. Embora sejam fáceis de operar, rápidas e eficientes a detetar a atividade das

descargas coroa, mesmo a distâncias seguras da região afetada, o operador deve ser capaz de interpretar os resultados recolhidos pelo sensor.

O setor energético pode beneficiar desta tecnologia de manutenção preditiva, ao identificar a presença destas descargas antes dos seus efeitos destrutivos ocorrerem, no entanto, a relação entre o custo destes sensores e a aplicabilidade limitada leva a que estas inspeções sejam pontuais em casos de suspeita desta atividade.

Embora as soluções de UAV com sensores UV não sejam frequentes, os UAV podem complementar estas inspeções de duas formas – acoplando um sensor UV no UAV ou inspecionando posteriormente um elemento sob o efeito das descargas coroa.

A primeira permite concluir a importância dos ‘open payloads’ das soluções dos UAV. Com isto, qualquer tecnologia, devidamente adequada à integração de um payload, pode integrar os UAV e beneficiar das vantagens dos mesmos. Assim, as aplicabilidades inspecionais dos UAV são mais abrangentes do que simples inspeções visuais.

Por outro lado, sendo os sensores UV capazes de detetar as ocorrências das descargas a uma distância considerável do ativo em questão, os UAV podem simplesmente complementar esta tecnologia confirmando visualmente a presença de componentes danificados [66], como demonstrado nas figuras 50.



Figura 50 – Ponto quente detetado (em cima) e confirmação do defeito recorrendo a um UAV
[66]

Com isto conclui-se a versatilidade dos UAV de complementar as inspeções convencionais, devido aos custos reduzidos das suas operações, como se irá verificar, e à capacidade de revolucionar as atuais metodologias, ao ser capaz de integrar as tecnologias frequentes nessas mesmas metodologias.

3.5. SOFTWARES PROCESSAMENTO DE IMAGEM

As imagens obtidas pelo levantamento aéreo em função dos sensores anteriormente descritos devem ser posteriormente processadas até um produto final onde os resultados são analisados. Este processamento tem como objetivo automatizar a análise das imagens e apresentar os resultados num formato específico. Assim, estes softwares atualmente combinam a inteligência artificial disponível com plataformas de informação geográfica (GIS).

O levantamento aéreo dos UAV difere um pouco do levantamento convencional, visto que os sensores também não são os mesmos. Desta forma, os softwares de processamento foram desenvolvidos e adaptados para os UAV, permitindo um alto grau de automatização capazes de processar grandes quantidades de imagens embora limitados quanto ao tamanho das imagens.

Estes softwares podem ser abertos ou dedicados. Isto influencia o rigor do produto final. Os softwares abertos (ou *open softwares*) são compatíveis com os formatos de outros softwares de processamento e com as diferentes tecnologias dos sensores. Isto é, os softwares abertos permitem processar o levantamento (LiDAR, fotogramétrico e até mesmo termográfico) dos dados recolhidos pelos respetivos sensores.

São assim mais flexíveis ao conciliar as diversas tecnologias num só software, mas menos detalhados no produto final comparativamente aos softwares dedicados a tecnologias específicas e orientados para certos trabalhos. A limitação dos softwares abertos ao nível da quantidade de imagens pouco influencia o produto final pois o levantamento aéreo dos UAV não é tão extenso como o convencional.

Com isto, um dos softwares mais aclamados para o processamento dos UAS é nomeadamente o Pix4D.

O processamento tradicional complementa vários softwares dedicados e softwares de apoio geoespacial para obter um produto final preciso. Por exemplo, no processamento LiDAR,

os dados passam por várias etapas e softwares. O Riprocess da RIEGL permite um tratamento inicial e geral do levantamento e a precisão geográfica é garantida por uma ferramenta de apoio que permite conciliar dados específicos das imagens com as informações geográficas, ou seja, concilia a interpretação científica com a informação posicional de cada imagem ou ponto. Esta segunda ferramenta, nomeadamente o software FME, permite transformar e traduzir os dados para que sejam compatíveis com outros softwares. Após este tratamento, os dados podem passar por outros softwares para corrigir certos erros de processamento, de modo a obter um produto topográfico final pormenorizado.

Os softwares de processamento dedicados aos UAV complementam as diversas fases descritas, sendo que estes calibram a informação espacial e geram uma nuvem de pontos classificada através de técnicas machine learning. Assim, o processamento é menos complexo e demorado. A capacidade de manter o processamento num simples software deve-se também à módica característica do levantamento aéreo dos UAV, isto é, um UAV captura menos pontos do que os métodos tradicionais, onde num troço de 240 km são identificáveis mais de dois biliões de pontos que necessitam de classificação.

3.5.1. PROCEDIMENTO DE PROCESSAMENTO

Depois de importado o levantamento dos sensores, o procedimento de processamento consiste essencialmente em 3 passos, desde a calibração dos diversos parâmetros do respetivo software, a criação de uma nuvem de pontos (point cloud) de modo a gerar produtos em vários formatos. Estes processos estão resumidamente apresentados na figura 51 [67], [68].

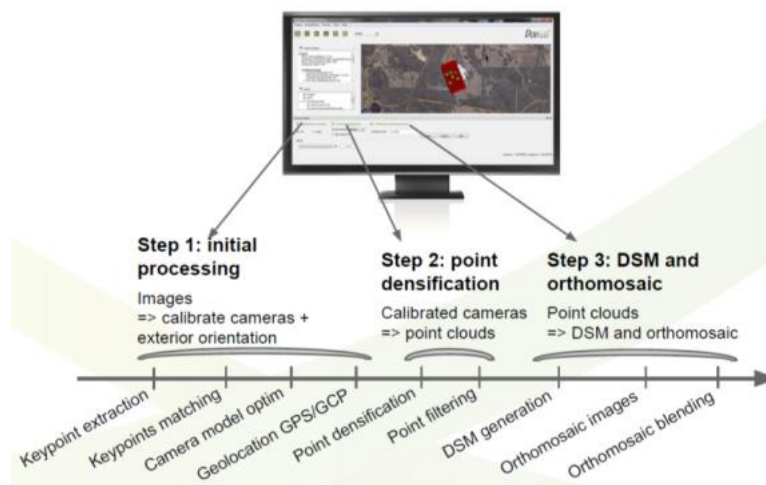


Figura 51 – Procedimento genérico de processamento de imagem [67]

A calibração consiste em definir os parâmetros da câmara, da lente e do voo no software de modo a que estes estejam orientados igualmente e a sobreposição das imagens corresponda à realidade. Certos softwares, como o Pix4D têm algoritmos de auto calibragem, isto é, o software obtém a informação de cada pixel das imagens de modo a calcular a calibração ótima da lente e da câmara para cada voo, sem intervenção de um operador. A auto calibragem calcula a distância focal da câmara, os pontos principais e as distorções radiais e tangentes, isto é, calcula a calibragem interna.

Para um processamento efetivo, a cada imagem deve corresponder uma sobreposição de 75%. O pormenor do processamento pode ser melhorado se durante o voo forem inclusive capturadas imagens oblíquas, no entanto isto implica mais tempo no decorrer das operações. O processamento pode ser complicado ou impossibilitado se não for possível determinar um número mínimo de pontos chave. Face a isto, a sobreposição entre cada imagem deve ser aumentada entre 80% a 95%, de modo a aumentar o número de pontos chave e consequentemente será necessário capturar mais imagens na mesma área de operação [69], [55].

A calibração exterior corresponde à etiquetagem geográfica de cada imagem. A exatidão da posição geográfica de cada ponto é melhorada através da presença de GCP (Ground Control Points), isto é, pontos que se sabe a localização exata e servem como referência para corrigir a calibragem exata das imagens. Em certos softwares, a presença de CGP pode ser obrigatória.

Após a calibragem dos parâmetros bem-sucedida, o software começa um processo de triangulação que permite identificar pontos chave (*keypoints*). Um *keypoint* é um ponto de interesse identificável em múltiplas imagens que irá integrar a nuvem de pontos. Sabendo as propriedades do ponto (posição geográfica, orientação da lente, etc.), o software combina estas informações, resultando numa posição triangulada em três dimensões desse ponto [69]. Na figura 52 é exemplificada a triangulação de um ponto. Idealmente devem ser sobrepostas quatro ou mais imagens por keypoint.

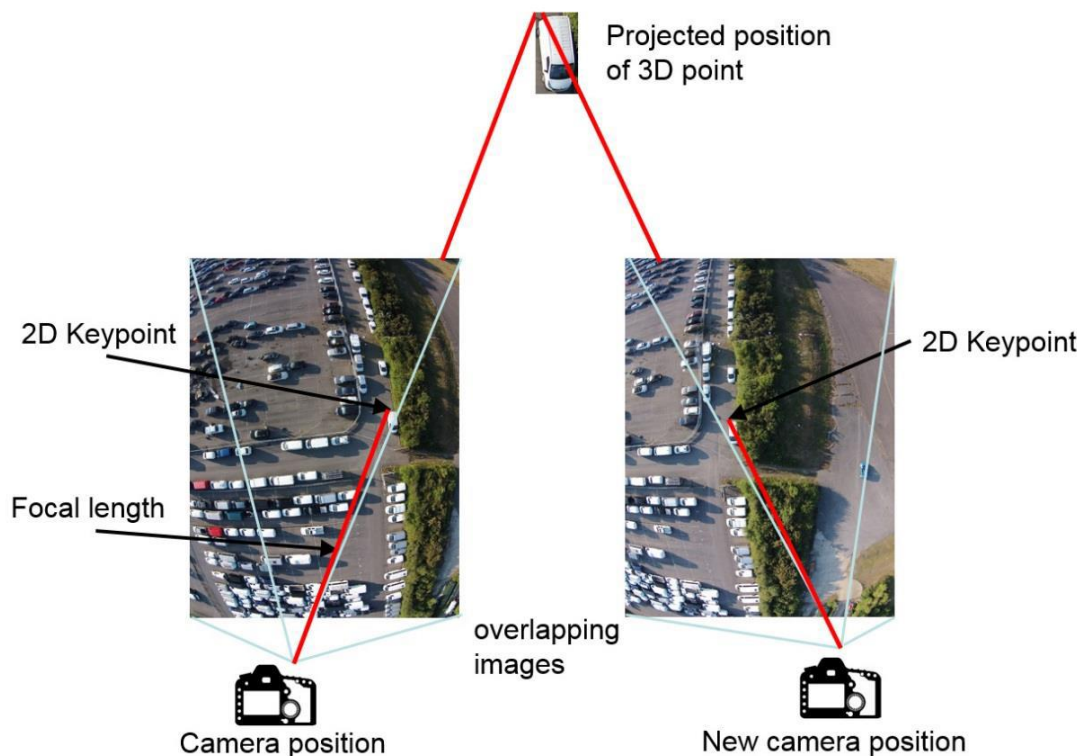


Figura 52 – Procedimento de triangulação na definição da nuvem de pontos [69]

De seguida, com os keypoints identificados, procede-se ao processamento da nuvem de pontos, que significa filtrar e suavizar os keypoints. Isto pois quando identificados vários pontos na mesma proximidade, a sobreposição destes pode criar uma espécie de ruídos que proporciona erros nas propriedades dos pontos. A filtragem é influenciada pelo GSD (Ground Sampling Distance), ou seja, a distância real que corresponde cada pixel. Assim, apenas os pontos dentro do raio do GSD corrigem os pontos. Quanto maior for o GSD (proporcional à da altura do voo), menor será a resolução e o detalhe do produto final [69].

O formato do produto final (output) é importante para que outros softwares consigam aceder aos seus dados, como programas e formatos de geo referenciamento (.GIS), de point clouds (.LAS), de fotogrametria (.KML) e até mesmo ferramentas AutoCAD [67].

3.5.2. OUTPUTS

É a partir da densa nuvem de pontos formada que surgem os vários possíveis outputs destes softwares. Começa por traduzir a nuvem para formato 3D Mesh (output semelhante à nuvem de pontos, com outro formato, apresentado na figura 53). Com esta, os dois outputs mais comuns são o orto mosaico e o DSM (Digital Surface Model).

O 3D mesh representa uma elevação algorítmica onde as imagens são distorcidas para se ajustarem à superfície da terra, aplicando as distâncias e os volumes estimados para cada objeto.



Figura 53 – Point Cloud (esquerda) e 3D Mesh (direita) [69]

O orto mosaico (figura 54) corrige a distorção radial e elevatória do 3D mesh, permitindo assim medir as distâncias entre dois pontos na imagem. No entanto, consiste numa representação 2D vista da superfície da terra, onde a escala da foto não corresponde à realidade.

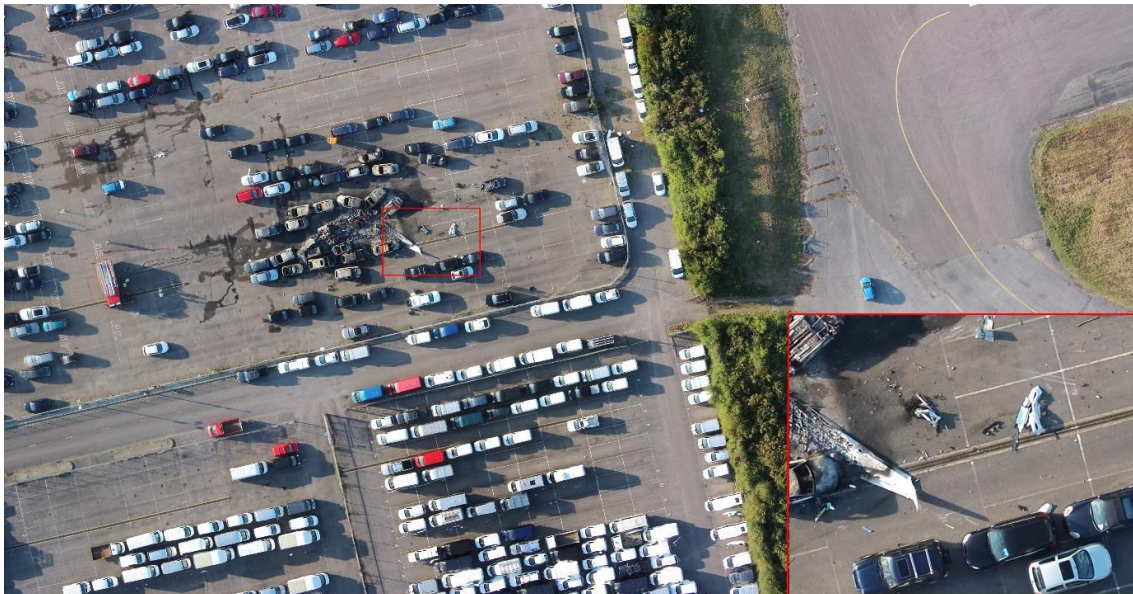


Figura 54 – Orto mosaico [69]

Por outro lado, o DSM (figura 55) representa a superfície da terra em termos de elevação, onde pode ser observado o terreno, a vegetação e objetos produzidos pelo homem. Assim, é possível medir a elevação do terreno ou as distâncias entre os vários obstáculos. Estas distâncias são precisas e corresponde às distâncias reais.

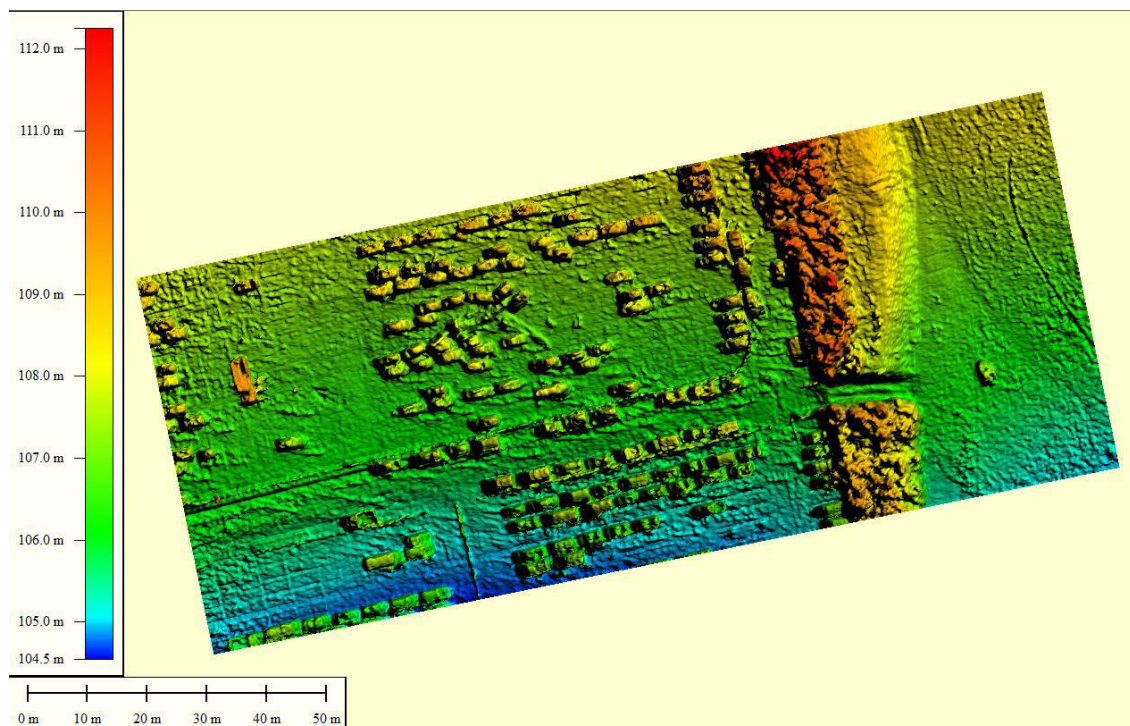


Figura 55 – Digital Surface Model (DSM) [69]

Entre as figuras 53 e 55 estão representados exemplos dos produtos finais possíveis destes softwares (Point Cloud, 3D Mesh, Orto Mosaico, DSM, respetivamente).

A qualidade destes outputs depende do software onde são processados. Sendo o Pix4D um software aberto e versátil, desenvolvido para operações com UAV, de seguida serão apresentados alguns exemplos da análise da qualidade do processamento deste software, realizados para diferentes casos e comparado com outros softwares [70]–[72], permitindo assim verificar a qualidade genérica destes outputs.

Tabela 5 - Distância Entre Pontos (Qualidade de Processamento) por Software [70]

	Pix4d	PhotoScan	MicMac
Máx. (m)	0,077	0,154	0,103
Médio (m)	0,004	0,003	0,006
Padrão (m)	0,017	0,016	0,021

Tabela 6 – Quantidade de Pontos Gerados por Software [70]

	Pix4D	PhotoScan	MicMac
Nº Pontos (Milhões)	4,4	3,5	4

Tabela 7 – Precisão de Processamento por Software [71]

	Pix4D	PhotoScan	MicMac
X (cm)	10,8	4,2	4,7
Y (cm)	11,4	4,6	5,5
Z (cm)	23,2	9,0	8,1

Analisando a tabela 5, as distâncias entre pontos do Pix4D estão a par dos restantes softwares comparados, sendo que com discrepâncias de distâncias mais baixas as imagens serão mais detalhadas. A quantidade de pontos gerados por cada software é semelhante (tabela 6). A tabela 7 indica-nos as diferenças entre os pontos e as coordenadas reais GPS, verificando assim que este software pode não ser o mais preciso, mas mantendo-se na ordem dos cm, compatível com os levantamentos de UAV.

Tabela 8 – Discrepância de Precisão e Classe de Processamento do Pix4D [72]

	A	B
Discrepância	0,075	0,046
GSD	0,014	
Classe	0,085 (C=6)	0,057 (C=4)
Classe (Média)	0,100 (C=5)	

A tabela 8 apresenta novamente a discrepância entre os valores médios de duas coordenadas processadas e as suas coordenadas GPS de um novo caso estudado e os indicadores estatísticos que permitem determinar a classe de precisão do processamento do software Pix4D em função do GSD.

A diferença entre a posição espacial destas coordenadas encontra-se novamente na ordem dos centímetros e com isto é possível determinar a classe de precisão dos dados digitalmente mapeados definida pela ASPRS (American Society for Photogrametry and Remote Sensing). Esta classificação permite avaliar a qualidade dos outputs dos softwares de processamento LiDAR ou fotogramétrico [73].

Segundo esta análise, o Pix4D enquadra-se classe 5, sendo que na classe 1 a discrepância teria de ser igual ao tamanho do pixel [72].

Tipicamente estes softwares apresentam intervalos de precisão na ordem dos 95% [74], podendo assim admitir que estes para além de serem versáteis ao incorporarem várias tecnologias de levantamento aéreo, também fornecem produtos que se comparam a softwares dedicados, com grandes níveis de rigorosidade. A tecnologia computacional destes softwares faz com que sejam de fácil enquadramento ao operador pois são automáticos em vários aspetos, como no cálculo fotogramétrico onde processam grandes quantidades de imagens e pontos com bons resultados profissionais.

3.5.3. MACHINE LEARNING

Como mencionado anteriormente, o processamento do levantamento dos UAV implica menos poder computacional, pois são identificáveis menos pontos e as imagens processadas não requerem tanta qualidade quando comparadas ao levantamento tradicional.

Desta forma, as técnicas de machine learning do levantamento dos UAV não precisam de ser tão robustas. O machine learning do software Pix4D de momento consegue classificar 10 milhões de pontos em apenas três minutos, automaticamente. No entanto esta classificação é de certa forma genérica, visto que se limita a identificar certos tipos de obstáculos presentes nas imagens, como edifícios, vegetação ou estradas. Sucintamente, a

técnica de machine learning do Pix4D classifica os pontos em função da sua elevação e do tipo de obstáculo [75].

As técnicas de machine learning consistem em evoluir os seus algoritmos à medida que processam mais dados. Ao fornecer mais dados ao algoritmo e informá-lo o que cada ponto representa visualmente, o algoritmo de processamento irá classificar cada ponto conforme essa informação. Os algoritmos armazenam então estas informações de modo a voltarem a aplica-la noutra processamento com base no que aprendeu e evoluiu dos processamentos anteriores.

À medida que o software processa mais informações, o sistema irá ficar mais eficiente e automático, permitindo tornar este processo, tradicionalmente demorado e trabalhoso, independente de um operador.

Para uma classificação mais profissional, o machine learning deve ser robusto e especializado para os mais diversos serviços. Por exemplo, o software LiDAR360, utilizado tradicionalmente como processamento pormenorizado, permite identificar os mais diversos ativos na nuvem de pontos. No caso dos serviços de distribuição de energia, o software apresenta um módulo que identifica os apoios e os condutores e classifica as distâncias críticas da vegetação aos ativos. Opcionalmente, o software também simula a influência das variáveis ambientais nos corredores das linhas inspecionadas [76].

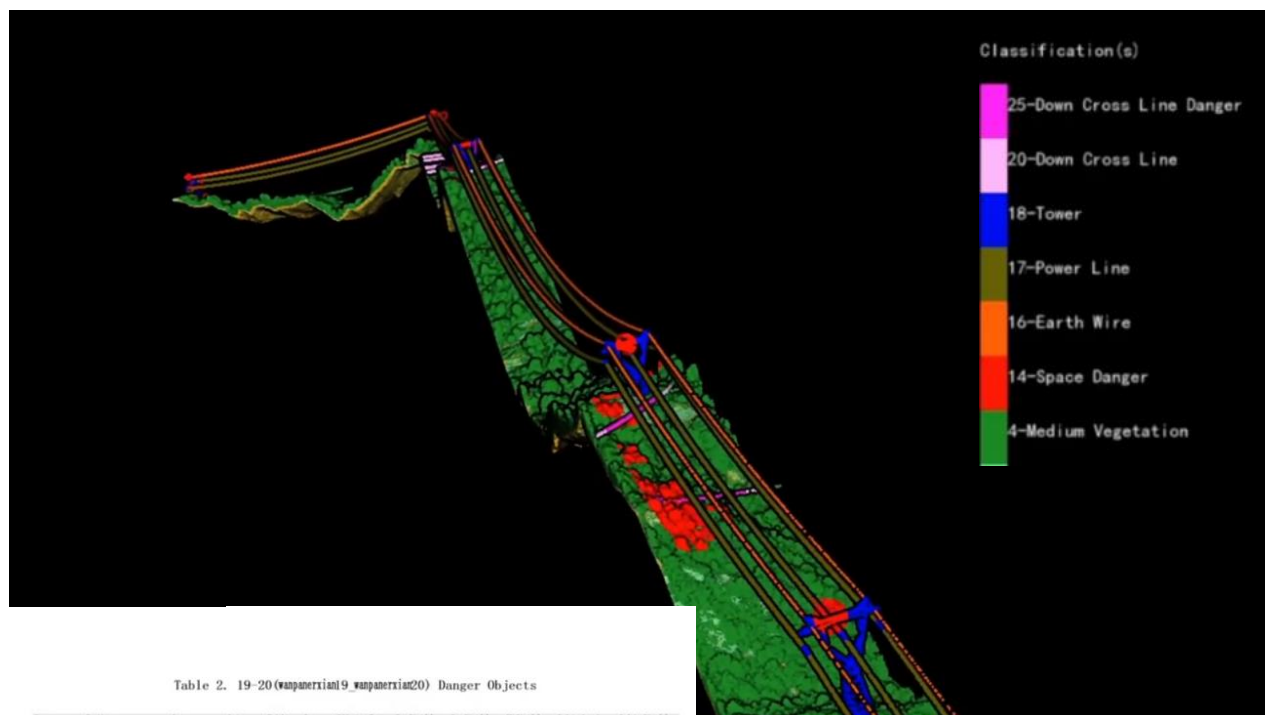


Table 2. 19-20(wanpanxian19_wanpanxian20) Danger Objects

No.	Section	Lon	Lat	Height	Range	Offset	Type	Min Distance	Max Distance	30 Distance	Safety Level	Safety Distance
1	ReportLine19-ReportLine20	106.34144717	30.89041297	462.179	323.589	174.660	4	15.470	9.763	15.400	-	-1.000

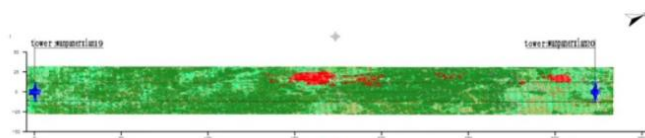


Figure 3. 19-20(wanpanxian19_wanpanxian20) Top View.

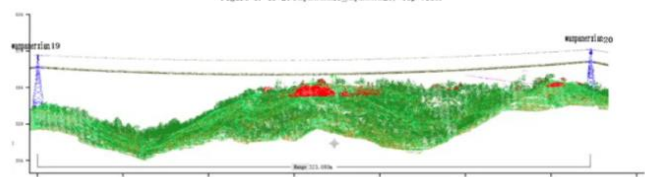


Figure 4. 19-20(wanpanxian19_wanpanxian20) Side View.

2. Danger Objects Table

No.	Section	Lon	Lat	Height	Range	Offset	Type	Min Distance	Max Distance	30 Distance	Safety Level	Safety Distance
1	ReportLine19-ReportLine20	106.34144717	30.89041297	462.179	323.589	174.660	4	15.470	9.763	15.400	-	-1.000
2	ReportLine19-ReportLine21	106.34144717	30.89041297	462.179	323.589	174.660	4	15.470	9.763	15.400	-	-1.000
3	ReportLine20-ReportLine21	106.34144717	30.89041297	462.179	323.589	174.660	4	15.470	9.763	15.400	-	-1.000
4	ReportLine21-ReportLine22	106.34144717	30.89041297	462.179	323.589	174.660	4	15.470	9.763	15.400	-	-1.000
5	ReportLine22-ReportLine23	106.34144717	30.89041297	462.179	323.589	174.660	4	15.470	9.763	15.400	-	-1.000

Figura 56 – Post-Processing do software LiDAR360 e relatório de distâncias críticas [61]

Este tipo de classificação pode ser designada como “post-processing”, exemplificada na figura 56 onde estão identificados os apoios, os cabos, a geometria dos vãos e as distâncias mais críticas. Em tecnologias mais avançadas do levantamento tradicional, o processamento permite mesmo classificar os ativos danificados e identifica-los ao longo dos vastos corredores inspecionados. Esta capacidade é útil pois permite complementar o mapeamento com a inspeção visual de pormenor.

No entanto, nos UAV, o machine learning ainda se encontra em fase de adaptação, sendo exemplo a classificação generalizada do Pix4D.

Por outro lado, a plataforma de processamento da Delair (Delair.AI, apresentada na figura 58) é a mais recente e dedicada especialmente a levantamentos UAV e mapeamento.

Para além de um software de pré-processamento que constrói geograficamente a área mapeada através da sobreposição de fotos e da telemetria disponibilizada pelo sistema PPK (Delair After Flight, figura 57 [77]), a Delair desenvolveu uma plataforma onde a técnica de machine learning permite realizar um processamento pormenorizado, isto é, classifica cada ponto segundo a sua elevação e propriedade física (se é condutor, apoio, etc.) e determina as distâncias críticas da vegetação [78] [79].



Figura 57 – Delair After Flight (Software de Pré-Processamento) [77]

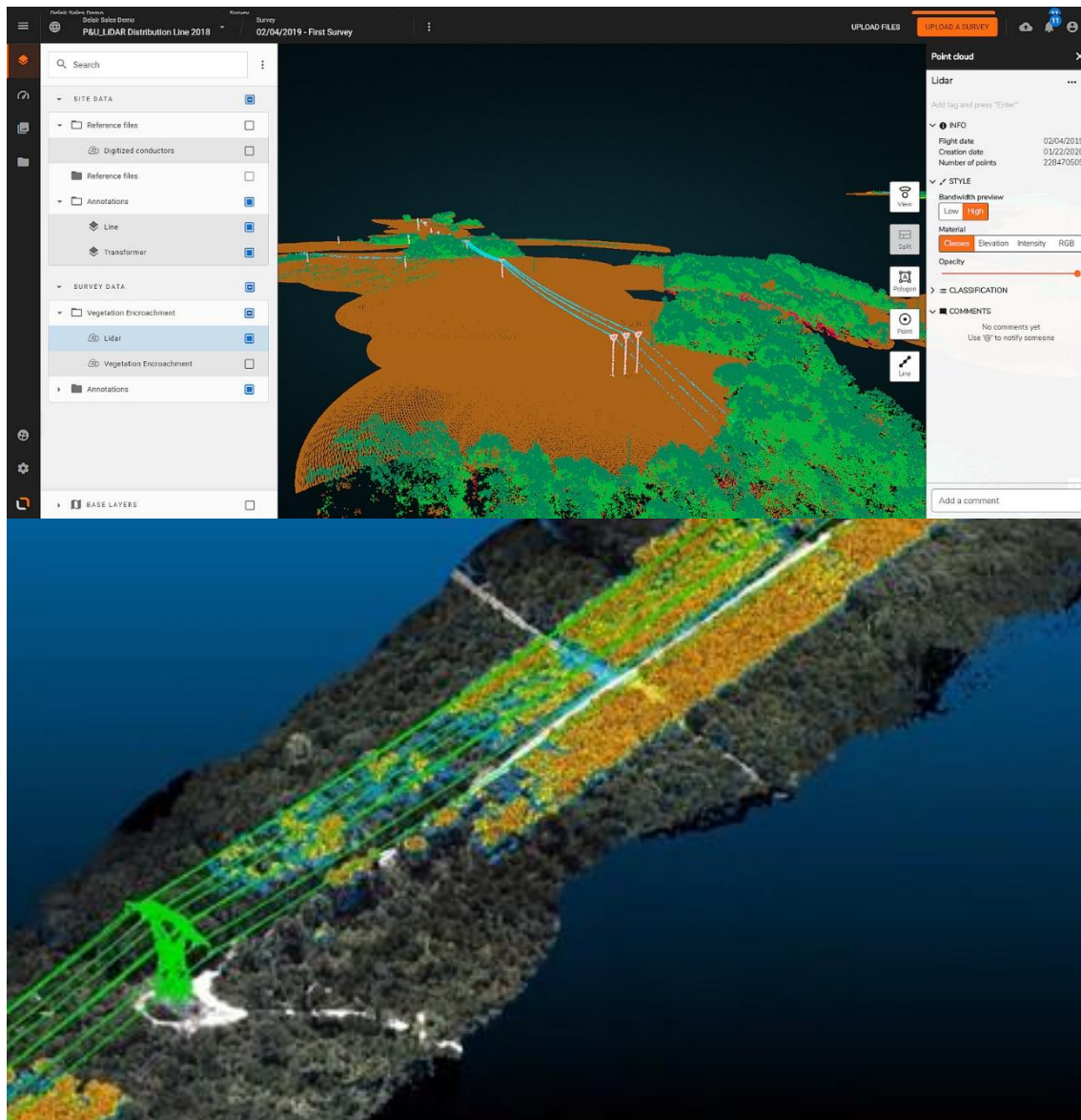


Figura 58 – Delair.AI (Software de Pós-Processamento) [78]

Assim, a capacidade de gerar um output preciso, de classificar com rigor cada ponto e de detetar a invasão da vegetação torna esta plataforma e esta entidade a mais relevante do mercado.

A Delair oferece soluções integradas de hardware e software que competem neste mercado, o que torna os seus sistemas ideais para aplicações profissionais.

Com isto, à frente irá ser analisada a forte presença da Delair nos vários serviços públicos, especialmente na distribuição de energia, onde prestou demonstrações das operações com os seus sistemas UAV e o processamento das mesmas.

Recentemente a Delair aliou-se à DJI, uma entidade de soluções de UAS de asa rotativa (drones e respetiva instrumentação de levantamento aéreo), permitindo ao seu software processar dados capturados pelos sensores da DJI. Isto acrescenta mais flexibilidade à plataforma ao permitir interligar tecnologias e softwares de outras entidades.

3.6. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Os UAV são tecnologias desenvolvidas há diversos anos inicialmente com usos recreativos e militares. No entanto, com a evolução da tecnologia, a regulamentação aérea e de responsabilidade começou a ser adaptada para fins profissionais. Agora, os UAV apresentam desempenhos e designs que se enquadram em diversas áreas profissionais. Nestes âmbitos, as operações devem sempre diminuir os riscos humanos e materiais envolvidos, proporcionado pelos sistemas de navegação e controlo que desbloqueiam operações mais abrangentes e seguras.

As entidades que desenvolvem os UAV profissionais também disponibilizam sensores adaptados a uma gama de tecnologias que enquadram inúmeras funcionalidades no âmbito do levantamento aéreo, desde termografia, ultravioleta, laser e simples sensores óticos com capacidades de zoom indicados para inspeções de pormenor. Este levantamento deve ser processado por softwares também desenvolvidos pelas mesmas entidades cujos objetivos são a evolução deste mercado profissional com operações mais seguras, automáticas e eficientes, fazendo assim face às metodologias tradicionais de inspeção.

4. ANÁLISE DA APLICABILIDADE

Este capítulo aborda a análise da aplicabilidade dos UAV nas metodologias das inspeções da REN. A análise terá em conta a segurança e as características operacionais desta ferramenta e é fundamentada pelos diversos sistemas descritos no capítulo anterior.

Ao nível da segurança, a análise resume os benefícios que os UAV apresentam noutros serviços e os obstáculos que devem ser superados para habilitar esta nova metodologia. Para concluir, serão apresentadas demonstrações que confirmam a aplicabilidade dos UAV na RNT.

Verificada a viabilidade e a segurança desta nova ferramenta nas inspeções, o capítulo conclui com uma estimativa económica desta metodologia na RNT, comparando sempre com a qualidade dos serviços das metodologias atuais.

4.1. ANÁLISE DA APLICABILIDADE

Com o estado da arte dos diversos sistemas de hardware e software identificados, surgem algumas considerações e barreiras à implementação dos UAV. Sejam estas barreiras regulamentares ou operacionais, com este subcapítulo pretende-se identifica-las e resolver esses obstáculos.

Antes das barreiras, o capítulo anterior permite rapidamente identificar diversos benefícios diretos. Nomeadamente, as operações dos UAV aparentam ser mais seguras, rápidas e económicas quando comparadas às metodologias conservadoras tradicionais.

Estes aspetos serão analisados mais rigorosamente no final deste capítulo, no entanto, os dados que se seguem baseiam-se em casos estudados de aplicações dos UAV em diversos outros serviços. Trata-se da integração dos UAV na inspeção de uma ponte, que tradicionalmente nem recorre a helicópteros neste âmbito, mas a um veículo desenvolvido especificamente para estas funções (UBIT (Under Bridge Inspection Truck)).

Este caso serve para evidenciar que os UAV podem apresentar benefícios diretos ao nível de risco e financeiro e novas soluções mais viáveis que as ferramentas tradicionais, principalmente em inspeções localizadas, como neste caso estudado e em vários outros serviços. Por fim, iremos averiguar a aplicabilidade na REN e se estes benefícios se verificam.

Operações Seguras

Os UAV claramente são uma vantagem ao nível da segurança e de redução de riscos pois permitem manter as equipas fora de situações de risco [80]. No caso das inspeções com recursos a helicópteros é necessário manter uma distância de segurança às linhas elétricas, por exemplo, de modo a minimizar os riscos. No entanto, isto pode dificultar o processo de levantamento aéreo e diminuir a qualidade da imagem. Em certos trabalhos também pode não ser necessário retirar as infraestruturas de serviço visto que a mão de obra se encontra localizada remotamente ao UAV.

Assim, os riscos e os custos diminuem também por estarem menos pessoas associadas às inspeções. A tabela 9 ilustra a redução dos riscos envolvidos com pessoal e por sua vez a diferença de custos durante a inspeção de uma ponte [80].

Tabela 9 – Comparação Genérica do Custo, Tempo e Equipa das Metodologias [80]

	Equipa Envolvida	Tempo despendido	Custos Envolvidos
Inspeção com UBIT	3-4	8 horas	4600€
Inspeção com UAV	2	1 hora	2500€

Operações Eficientes

Os UAV podem otimizar a rapidez das inspeções por serem mais versáteis que os helicópteros, mas para isso os objetivos das inspeções devem ser previamente bem definidos, como as rotas, os ativos que se pretendem inspecionar e consequente ângulos, trajetórias, alturas e velocidades dos voos.

Da análise da mesma inspeção visual a uma ponte, esta contou com um tempo de preparação de 25 minutos, um primeiro voo de 10 minutos e um segundo voo de 7 minutos [80]. Os voos poderiam ser mais demorados, até cerca de 25 minutos por voo, o que, por exemplo, no caso da REN, este tempo extra poderia ser usado para inspecionar os ativos mais detalhadamente ou até inspecionar mais ativos nas redondezas.

Assim, as inspeções localizadas têm capacidade de se tornarem até oito vezes mais rápidas, sem ter em conta que inspeções mais pormenorizadas requerem mais tempo [80].

No entanto, é necessário realizar demonstrações e inspeções mais abrangentes para determinar se os UAV podem diminuir os tempos das inspeções no âmbito da REN, sendo que a deslocação terrestre será um fator a considerar nas inspeções pormenorizadas aos apoios.

Integrando os UAV como uma nova ferramenta interna, este pode complementar qualquer tarefa indicada, sem grandes custos associados e sem que o tempo da operação seja um fator.

Operações Económicas

Nas operações dos UAV, os custos podem ser reduzidos devido à redução do risco, do tempo das inspeções e dos baixos custos operacionais (de utilização). Os principais custos dos UAV integram a aquisição e a manutenção do mesmo [81] e a presença da equipa no campo de trabalho. No entanto, em situações que seja apenas necessário um técnico e uns binóculos, os fatores de custo e tempo não serão melhorados, apesar de conseguirem complementar esta tarefa com características mínimas. Com isto, o principal objetivo dos UAV será substituir ou integrar as tarefas tradicionais realizadas por helicópteros.

Assim, um serviço prestado com recurso a UAV poderá apresentar um orçamento que não se aplique diretamente e totalmente aos custos da operação (equipa, deslocações, tempo da operação), mas tem em vista recuperar então os investimentos e as manutenções e cobrar o serviço em si.

Vários estudos de análise de custos nas mais diversas utilities apontam para uma melhoria significativa dos custos face às respetivas metodologias tradicionais [80]. No caso da REN, desta análise interessa verificar o custo por quilómetro (€/km) de linhas inspecionadas.

Tabela 10 – Diferença dos Custos Envolvidos nas Metodologias [80]

	Gestão do Ativo (€/h)	Aluguer do Veículo (€/h)	Piloto (€/h)	Inspetor (€/h)	Total (€/h)	Total da Inspeção (€)
Inspeção com UBIT	160	216	75	100	551	2204 (em 4 horas)
Inspeção com UAV	-	-	100	100	200	1800 (em 9 horas)

Neste exemplo apresentado na tabela 10, novamente da inspeção de uma ponte, denota-se os vários custos associados da respetiva metodologia tradicional, comparando com o UAV que apenas apresenta custos salariais da equipa mínima presente.

No entanto, o custo total da inspeção tradicional é semelhante à dos UAV pois por dificuldades técnicas, a segunda demorou mais tempo. Desta forma, o custo unitário (€/hora) não deixa de ser muito inferior ao método tradicional, o que conclui os baixos custos operacionais dos UAV.

4.1.1. BARREIRAS

Por outro lado, da análise do estado da arte dos UAS surgem certos aspetos relativos à regulamentação e performance dos UAV que devem ser identificados com o objetivo de conhecer a limitação destes aspetos e de que forma podem ser ultrapassados.

Entre estas estão as limitações impostas pela legislação, pelos sistemas tecnológicos de hardware e software e por fatores ambientais, ou seja, limitações operacionais. É importante identificá-las de forma a reduzir os riscos das operações e reconhecer que através das tecnologias já tão desenvolvidas, as operações são realmente mais seguras, isto é, os UAV já estão programados para as diversas aplicabilidades profissionais.

Barreiras Regulamentares

As principais limitações regulamentares restringem determinados voos e em certos locais. Em locais urbanos, a legislação proíbe geralmente a descolagem dos UAV, por motivos de segurança pública (de pessoas). Tipicamente, as linhas da REN são em zonas rurais ou remotas, sem tráfego ou aglomerados de pessoas, excepto por exemplo, em travessias de autoestradas. Assim, esta limitação aplica-se reduzidamente às aplicabilidades na distribuição de energia, como se verifica na figura 59 onde são visíveis vários apoios em locais remotos e com reduzidos obstáculos aéreos.



Figura 59 – Exemplo de corredores em locais remotos e onde são visíveis vários apoios, ainda que distantes (fonte própria)

A legislação determina a necessidade de manter o contacto visual com o UAV em todos os momentos, dificultando as operações de mapeamento solucionadas pelos UAV de asa fixa [80], [81]. Assim, a certificação prevê responsabilizar o operador para eventuais riscos de segurança infraestrutural, isto é, em caso de o sistema cair ou embater em obstáculos ou outras aeronaves nas redondezas. Certas soluções de UAS já apresentam esta certificação pelos avançados sistemas que incorporam, como a funcionalidade de ‘return-to-home’ em caso de anomalias durante a operação ou os sistemas de ‘sense and avoid’ e de ADS-B [80]. Desta barreira surge a principal consideração sobre os voos para além da linha de vista (BVLOS) que irão ser aprofundados em diante e aplicados em troços como a figura 59.

Barreiras Operacionais

Uma das principais limitações técnicas dos UAV é a questão da autonomia. Regra geral dos sistemas presentes no mercado, a autonomia das baterias dos UAV encontra-se entre os 25 a 30 minutos. Isto restringe as inspeções pois é necessário determinar quantas baterias são necessárias por inspeção e o tempo que delimita cada inspeção. Sendo que cada caso é diferente, pode ser necessário um controlo/gestão da frota dos UAV, definindo previamente certos parâmetros, como as baterias e a altura e velocidade do voo. Esta solução tem em vista a redução do tempo por inspeção e dos custos de baterias adicionais.

A perda das comunicações entre o GCS ou o GPS e o UAV é um dos fatores de risco dos UAV, sendo que se o UAV não obtiver informações posicionais, o piloto automático não consegue apoiar a navegação, aumentando o risco de danos ou perda do UAV. Os operadores contam com a informação do GPS na navegação e estabilidade do UAV e atualmente várias soluções incorporam sensores adicionais (IMU, ultrassom, laser,...) que suportam e complementam a navegação por GPS. No entanto, a perda do sinal GPS continua a ser um dos principais fatores de risco que limitam as aplicabilidades dos UAV. No caso específico da REN, poucos são os locais mais propícios a perdas de GPS por serem zonas remotas e amplas com pouca edificação, ao contrário, por exemplo, de inspeções sob pontes. No entanto, na proximidade das linhas elétricas podem ser frequentes interferências eletromagnéticas devido à alta tensão que nelas circulam.

Desta forma, os vários equipamentos dos UAV devem ser regularmente calibrados e alvos de manutenção de forma a reduzir os riscos associados às avarias destes componentes.

O processamento do levantamento aéreo enquadra grande parte do tempo despendido até à conclusão do processo de uma inspeção [81]. O processamento dos UAV ainda não se encontra otimizado e robusto como as técnicas tradicionais, devido ao recente aparecimento da aplicabilidade dos UAV, no entanto, o avanço destes softwares é claro e são cada vez mais eficientes e automáticos. Da mesma forma, as melhorias no controlo, na navegação e no processamento de imagem ainda têm margem para crescimento, apesar da considerável tecnologia existente. Estes avanços eliminam certas barreiras, tornando as operações e pós operações com UAV mais autónomas e automáticas. Desta forma, nas estimativas do desempenho dos UAV (no subcapítulo seguinte), considerar-se-á que o tempo de processamento dos UAV é o mesmo que o da metodologia tradicional.

Atualmente, o ‘payload’ dos UAV restringe as suas aplicabilidades a inspeções visuais e mapeamento, pela limitação do acoplamento a sensores visuais, sendo que as suas aplicações físicas são mais reduzidas. No entanto, em diante serão mencionadas outras aplicabilidades dos drones na rede elétrica.

Barreiras Ambientais

As barreiras ambientais consistem essencialmente nos riscos envolvidos por fatores externos, como as condições atmosféricas adversas. Estes fatores podem ser evitados remarcando/adiando as inspeções, mas por vezes isto pode não ser possível por fatores internos às entidades, como a calendarização apertada e a sobrecarga das equipas.

No entanto, os sistemas já resistem e adaptam-se às más condições climatéricas. Isto pode ser apoiado novamente com uma boa gestão da frota e das inspeções, sendo possível prever as condições ambientais, como a velocidade do vento ou ângulos especiais que não sejam influenciados pelas sombras ou contraluz. Posto isto, os UAV apresentam grandes estabilidades mesmo com ventos fortes, até 12 m/s [38], como se verifica pela figura 60 o desempenho do DJI M210 onde alegadamente, durante a tempestade Harvey nos Estados Unidos da América, o vento e as chuvas teriam uma força de 9 m/s [82]. De facto, a DJI foi uma entidade fundamental na gestão desta tempestade (e entre outras), onde os seus UAV funcionavam em condições atmosféricas desfavoráveis. Apesar da qualidade de imagem ser muito afetada pelas condições atmosféricas, seja chuva, vento ou simplesmente nevoeiro, os UAV não apresentam os mesmos riscos que os helicópteros em situações de visibilidade reduzida.



Figura 60 – Resistência e estabilidade do DJI M210 em condições atmosféricas adversas [82]

Sendo o risco de danos ou perda total do UAV devido à fragilidade e vulnerabilidade destes sistemas a colisões, pode ser necessário manter distâncias especialmente seguras, conseguidas pela instrumentação sensorial de boa qualidade e com grandes capacidades de zoom e pelos sistemas de controlo e navegação de grande precisão.

4.1.2. BEYOND VISUAL LINE OF SIGHT (BVLOS)

Os voos BVLOS são operações em que o UAV encontra-se para além da linha de vista do piloto remoto. Estas operações são condicionadas por uma norma europeia, adaptada ao regulamento português [26], com o objetivo de gestão de risco de todas as operações, com especial restrição para as operações BVLOS.

Os voos BVLOS aplicam-se principalmente a soluções de UAV de asa fixa e requerem especial certificação pois não permitem compreender a técnica de aviação ‘see-and-avoid’, a principal técnica de controlo e navegação de aeronaves pilotadas, de modo a evitar colisões com obstáculos e outras aeronaves nas proximidades.

Os UAV precisam de ser “airworthy (figura 61)” para conduzir estas operações complexas, não compatíveis com a interferência de um operador, mas facilitadas pela automatização dos sistemas [83].



Figura 61 – Aspectos de certificação BVLOS [84]

As operações BVLOS são bastante vantajosas pois os UAV ao voarem fora do alcance do piloto remoto, permitem cobrir grandes distâncias com custos reduzidos, comparativamente são uma solução viável à substituição das metodologias tradicionais, nomeadamente os helicópteros nas inspeções. Também permitem reduzir o tempo de preparação (*deploy time*) face às operações em linha de vista, pois não é necessário deslocar o piloto remoto para cobrir a mesma área. Assim, visto que as operações BVLOS não requerem um operador a pilotar o voo, as operações são automatizadas e o *timing* do levantamento aéreo e das inspeções são consequentemente melhorados [84].

Os voos BVLOS apresentam numerosas aplicações topográficas nas mais diversas utilities, mais precisamente para mapear grandes áreas, construções, “right-of-way (ROW)” de autoestradas ou linhas elétricas, neste caso. Assim, é frequente a acoplação de soluções fotogramétricas e LiDAR nos respetivos UAV.

No entanto, as operações BVLOS são reguladas por apresentarem riscos a pessoas e propriedades, sendo que estas não são controladas diretamente pelo piloto remoto.

Posto isto, as soluções dos UAV devem estar habilitadas com as devidas tecnologias de modo a combater estas restrições técnico-regulamentares. Assim, um UAV é considerado “airworthy” conforme o seu design e segurança operacional [83]. Inicialmente foram

registadas inúmeras aplicações para esta certificação (ilustrativamente, 1200), no entanto 99% foram recusadas.

Sucintamente, as soluções BVLOS devem procurar desenvolver um design que permita percorrer longas distâncias com boa estabilidade e autonomia (certas soluções de asa fixa obtêm autonomias de uma hora) e garantir o controlo do espaço aéreo, mesmo com o piloto afastado do local da missão. Para isso, os sistemas UAV para operações BVLOS devem [83], [85], [86]:

- Adaptar a técnica see-and-avoid por controlo através de sensores (sense-and-avoid);
- Garantir uma continuação contínua e sem perdas de telemetria entre o UAV e o GCS;
- Retorno ao local de descolagem (Return-to-Home) em segurança, no caso de uma falha maior na comunicação.

Estes são os principais requisitos para as soluções serem certificadas para operações BVLOS. No primeiro, não sendo possível o operador observar diretamente o espaço aéreo, as técnicas sense-and-avoid recorrem a computadores e sensores para detetar o ambiente e o tráfego aéreo nas redondezas e navegar em segurança de acordo com estas informações. No entanto, por o UAV se encontrar afastado do piloto remoto com possíveis obstáculos entre eles, as perdas de comunicação são frequentes (principalmente nas comunicações de rádio), não sendo possível navegar pelo piloto automático que surge da técnica sense-and-avoid. Assim, os sistemas devem garantir que estas comunicações não se perdem e definir um plano de emergência em caso de falhas graves nas comunicações.

Como o piloto remoto de um UAV não é capaz de proporcionar a mesma mitigação de potenciais perigos que o see-and-avoid, os próprios UAV devem ser capazes de realizar uma função semelhante. A isto designa-se sense-and-avoid, apresentado na figura 62, que inclui detetar um perigo, manter um afastamento seguro e realizar manobras de evasão se necessário.

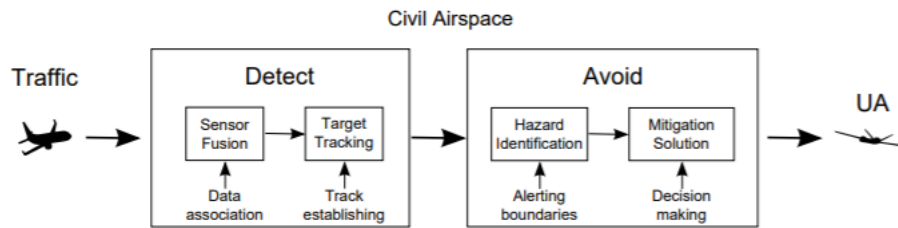
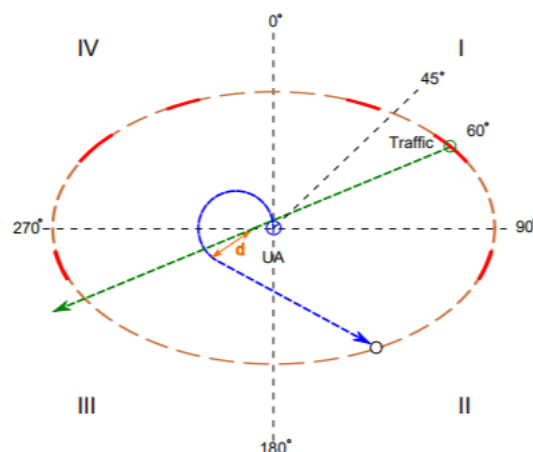


Figura 62 – Princípio da técnica “sense-and-avoid” [87]

Para isso existem diversas tecnologias, mencionadas no capítulo anterior e entre outras, que proporcionam este conceito ao máximo, mas nenhuma solução assume-se como única, desde que desbloqueie operações BVLOS em segurança [87]. Podem ser acoplados sensores visuais que permitem a transmissão de vídeo da trajetória do UAV em direto, de forma a que o piloto remoto observe o percurso do UAV, solucionando parcialmente a questão da técnica see-and-avoid. Outras técnicas e sensores complementam o “first person view (FPV)” dos sensores óticos, alertando para os restantes perigos – obstáculos e aeronaves. Estes sensores podem ser de ultrassom, e laser, e detetam obstáculos em função do tempo de retorno das ondas provenientes destes sensores, como mencionado anteriormente, ou ADS-B, que deteta outras aeronaves para um tráfego controlado e cooperado.

Os dados destes sensores são então enviados e processados pelo UAS de forma a realizar manobras de evasão por algoritmos desencadeados pela presença de perigos. Exemplos de estratégias de evasão estão apresentadas nas figuras 63.



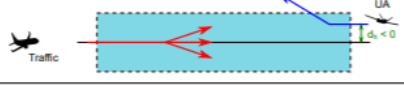
Geometric Classification	Action	Diagram
Traffic above UA $d_h > 0$	UA descending $\dot{h}_{UA} < 0$	
Traffic below UA $d_h < 0$	UA climbing $\dot{h}_{UA} > 0$	
Co-altitude and traffic climbing $d_h = 0$ and $\dot{h}_{TRAFFIC} > 0$	UA descending $\dot{h}_{UA} < 0$	
Co-altitude and traffic levelling $d_h = 0$ and $\dot{h}_{TRAFFIC} = 0$	UA descending $\dot{h}_{UA} < 0$	
Co-altitude and traffic descending $d_h = 0$ and $\dot{h}_{TRAFFIC} < 0$	UA climbing $\dot{h}_{UA} > 0$	

Figura 63 – Manobras de evasão desencadeadas na proximidade de perigos [87]

Com isto conclui-se a importância das diversas ligações de comunicação existentes num UAS. Qualquer perda de comunicação pode originar a que o UAV não responda de forma adequada ao perigo e aumente os riscos de colisão. Por exemplo, numa perda de comunicação com o sistema ADS-B, o tráfego aéreo não é detetável, ou principalmente, a perda de comunicações entre o UAV/GCS não proporciona a transmissão e processamento da telemetria em resposta ao sense-and-avoid.

Assim, os sistemas de comunicação em operações BVLOS devem ser robustos, estendidos e compostos para evitar a perda das mesmas. Desta forma as antenas de rádio do GCS devem ser mais robustas, para permitirem alargar a distância de transmissão com o UAV até uma certa atenuação sem perder o sinal. Geralmente, as soluções de UAV para operações BVLOS conseguem distâncias de transmissão até 8 km sem perdas significativas, suficiente para este tipo de voos. No entanto, em função do local de operação, obstáculos entre as conexões podem proporcionar a perda das mesmas, sendo que certas soluções optam por complementar a transmissão rádio com transmissores celulares (3G/4G). Estando as redes celulares teoricamente sempre disponíveis, com vastas infraestruturas espalhadas por todo o território e com velocidades de transmissão superiores ao dos satélites, a comunicação celular não terá grandes volumes de serviços celulares nas zonas de operações dos UAV (e da REN).

Mesmo com comunicações firmes e duplas, o risco de perda de comunicação continua a ser um dos principais pormenores a desbloquear. Com isto, os sistemas de piloto

automático dos UAV devem ser capazes de abortar a operação em situações de avarias mais extremas e responder ao cenário em função da avaria. Por exemplo, se todas as comunicações forem interrompidas, o piloto automático deve retomar o UAV em segurança ao ponto de partida enquanto as comunicações não forem repostas.

Para isso, os sistemas de término de voo impedem que o UAV continue a operação fora das condições normais de voo, por exemplo, quando as comunicações entre o piloto remoto e o piloto automático são perdidas durante mais que um tempo estipulado (geralmente, 2 minutos). Previamente, as soluções devem permitir gerar uma cerca geográfica (Geofence, figura 64) em torno da trajetória estipulada, para que o UAV nunca saia da zona limitada à operação e, caso aconteça, consiga voltar imediatamente à trajetória da forma mais segura. Mesmo dentro da zona restringida, a perda das comunicações deve desencadear uma funcionalidade de retorno ao local de decolagem (Return-to-Home), para que o UAV se aproxime do GCS e se reestabeleça a comunicação ou para abortar por completo a missão, independentemente do plano de voo predefinido.



Figura 64 – Limitação da área de operação do UAV (Geofence) [87]

Resumindo, para os UAS serem certificados para voos BVLOS devem:

- Desenvolver designs de UAV que permitam percorrer longas distâncias;
- Substituir a técnica see-and-avoid por transmissão de vídeo em direto (FPV) ao piloto remoto;
- Complementar FPV com sensores que detetam as redondezas do UAV (sense-and-avoid);

- Desenvolver algoritmos de evasão de perigos em função dos dados dos sensores;
- Alargar as comunicações rádio para alcançar as distâncias das operações BVLOS;
- Complementar as comunicações rádio com comunicações celulares;
- Limitar o perímetro de operação do UAV;
- Mecanismos de término da operação e “Return-to-Home” em segurança;

Estas técnicas desbloqueiam as operações segundo um piloto automático já bastante robusto, no entanto, o operador do piloto remoto requer especialização teórica e prática no contexto destas operações devido a estas nuances que diferem das inspeções convencionais dos UAV. Assim, devem ter conhecimentos claros das regras de aviação, de meteorologia, da navegação, desempenho e gestão destes UAS, para além de um determinado número de horas em operações dentro da linha de vista.

Cumpridos estes requisitos, as soluções dos UAS permitem operações automáticas e seguras, certificadas para voos BVLOS. As tecnologias acertadas desbloqueiam os voos BVLOS em função do design e da segurança do UAV, sendo que esta é uma restrição principalmente regulamentar que pode ser relaxada com a evolução tecnológica dos UAV e com a colaboração entre os serviços e as entidades reguladoras da aviação.

Como demonstrado neste documento em vários momentos, as mais recentes soluções já conferem estes requisitos e são mais frequentes as demonstrações habilitadas destas aplicabilidades, nomeadamente a Delair com soluções de asa fixa. Os mais recentes UAV de asa rotativa também permitem operações seguras segundo os critérios aqui descritos, no entanto o seu design não é apropriado para operações BVLOS, mas sim para inspeções localizadas e pormenorizadas a ativos verticais.

4.1.3. GESTÃO DE FROTA

Devido à vasta lista de ativos e à extensão das linhas elétricas da REN, o aparecimento de distintos e complexos cenários faz com que um novo serviço que opere com UAV requere uma gestão das operações, recursos e inventário em função da missão a desempenhar.

Esta gestão pode-se designar por “gestão de frota” e surge devido à necessidade de caracterizar diversos parâmetros que variam e adaptam-se com base no cenário da operação [88].

Assim, nesta gestão deverão ser considerados parâmetros como:

- Gestão das trajetórias;
- Gestão dos ângulos indicados para um bom levantamento;
- Gestão das baterias;
- Altura do voo;
- Velocidade do voo.

Os dois primeiros parâmetros são essenciais na gestão dos recursos de cada inspeção. Consistem essencialmente em conhecer previamente o local da operação de modo a definir rotas que possibilitem inspeções otimizadas, rápidas e eficientes. Com isto, o plano da operação deve ser previamente bem delimitado, para que durante a operação não ocorram atrasos nem imprevistos operacionais.

Assim, a gestão das baterias é também otimizada. No entanto, para cada cenário o desempenho das baterias deve estar de certa forma padronizado. Definindo detalhadamente o plano da operação, pode-se estimar os recursos (como exemplo, as baterias) necessários para concluir a operação, se estes estiverem padronizados por cenários. Por exemplo, esta gestão deverá ter em conta que cada operação apenas utilize 80% da autonomia do UAV, para não danificar os ciclos das baterias, reduzindo os custos de manutenção.

Desta forma, as características dos voos também devem ser padronizadas para um levantamento eficiente. Por exemplo, os voos sob as linhas elétricas devem manter uma distância constante acima das linhas que permitem capturar toda a ROW. Também a velocidade do voo pode ser padronizada em função do poder computacional do software de processamento.

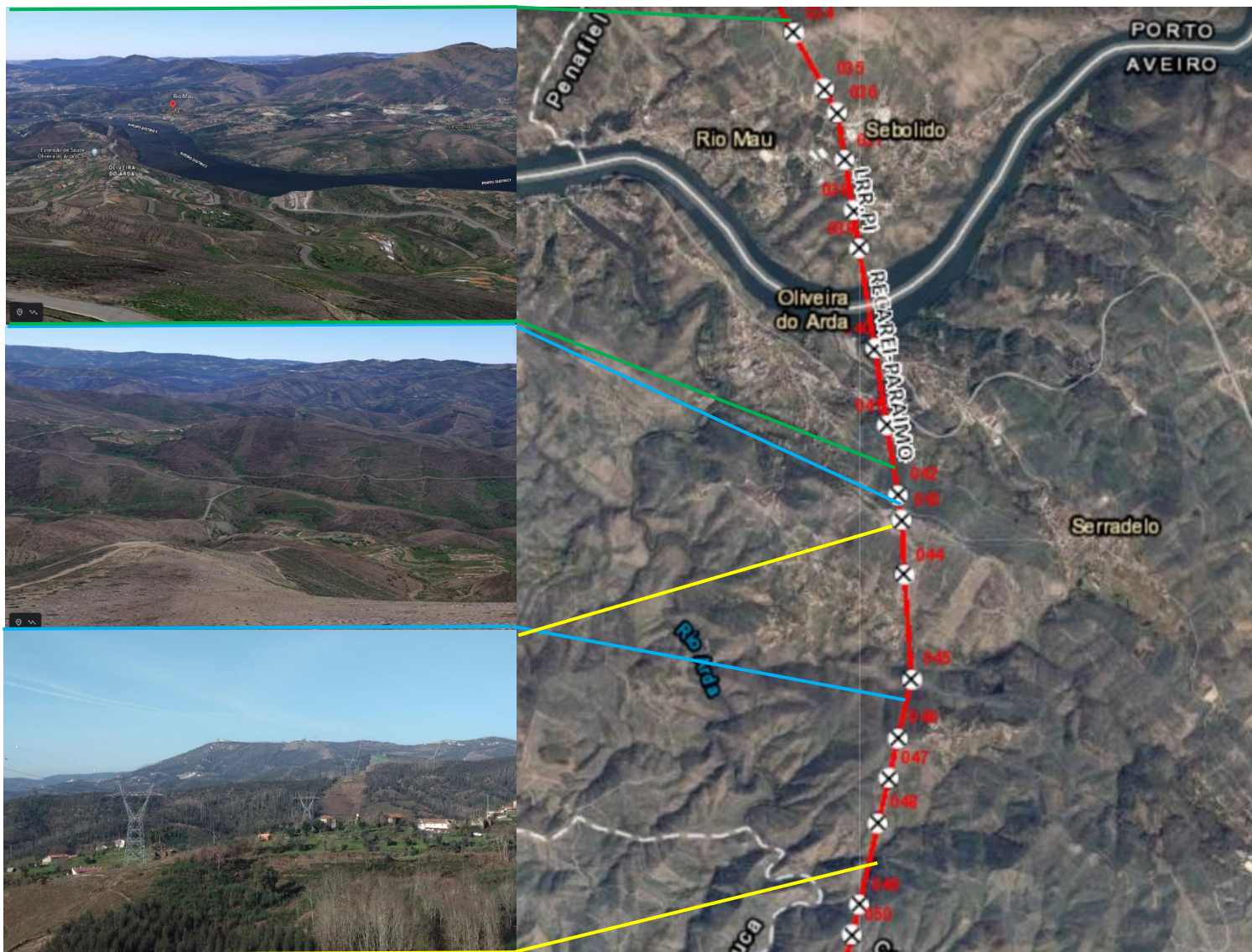
A “gestão da frota” serve para demonstrar a importância da gestão das operações, a padronização da utilização dos recursos e a monitorização destes aspetos de forma a otimizar este serviço [88].

As soluções dos UAS, da DJI ou da Delair, disponibilizam plataformas que facilitam a gestão das operações e monitorizam os recursos necessários para as mesmas. Nomeadamente, a plataforma da DJI, DJI FlightHub, permite hospedar as plataformas Cloud privadas das entidades (por exemplo, GIS) e gerir as operações sobre estas, antes, durante e após a operação, planeando previamente as trajetórias e monitorizando o consumo da aeronave e o estado das baterias para melhorar progressivamente cada inspeção, dotada de uma gestão mais qualificada por esta ferramenta [89]. Da mesma forma, a plataforma atualiza o firmware do UAV ao ritmo da evolução das tecnologias e do uso monitorizado por este programa.

Com isto, as soluções no mercado dos UAS, de asa rotativa ou fixa, apresentam todos os meios necessários para operações seguras e eficientes, desde designs, hardwares e sistemas de segurança adequados para as respetivas aplicabilidades, a softwares de gestão, processamento posicional e pormenorizado do levantamento aéreo, permitindo sempre conciliar com plataformas convencionais de processamento, de base de dados e de gestão das respetivas entidades.

A gestão das operações (trajetórias) permite pensar na definição de pontos estratégicos de *deploy* dos UAV ao longo da extensa linha elétrica da REN, de modo a otimizar a performance das baterias e a duração das inspeções.

Visto que a grande parte dos ativos se encontram em zonas rurais de difíceis acessos terrestres, pode ser importante integrar os conhecimentos dos gestores e técnicos das linhas de forma a identificar zonas com acessos facilitados e que permitam inspecionar o maior número de ativos nas redondezas, num único *deploy*, sem movimentar o piloto remoto entre esses mesmos ativos.



**Figura 65 – Troço da linha Recarei-Paraimo exemplificando um ponto estratégico no apoio 43
(fonte: própria, Google Maps e GeoREN)**

Como exemplo, a figura 65 apresenta um troço da linha Recarei-Paraimo, onde se encontra instalado o apoio 43. Este local é de grande elevação e permite observar um grande número de apoios dessa mesma linha. Assim, este local poderia ser um local de deploy para facilmente mapear ou inspecionar mais de 5 km de faixa (que seriam mais de 5km em deslocação terrestre) dos corredores observáveis nas figuras junto da linha. Como por cima das linhas não é frequente qualquer obstáculo, a gestão de trajetórias automáticas permite que o UAV percorra rapidamente estes corredores com riscos reduzidos. Concluída esta inspeção, a equipa poderá deslocar-se até ao ponto estratégico mais próximo que permita continuar a inspecionar o resto da linha elétrica.

Como este exemplo, durante uma inspeção apeada encontram-se vários locais semelhantes. Isto apresenta a importância da gestão antecipada das operações, de forma a conhecer as variáveis mencionadas e adaptá-las ao local da inspeção, otimizando assim as inspeções e reduzindo os “transfers” entre os ativos. A definição de pontos estratégicos ao longo de toda a rede elétrica nacional permite reduzir o número de deploys mas inspecionando a mesma quantidade de ativos, pois só assim a solução dos UAV se apresentará viável face à metodologia tradicional, sendo que os principais custos não lineares de ambas as metodologias estão diretamente relacionados com as deslocações/descolagens (*transfers*) das aeronaves. Então, este aspeto dinamiza ainda mais a flexibilidade de descolagem dos UAV suportado pelo desbloqueio das operações além da linha de vista.

4.1.4. CASOS REN

Para analisar a aplicabilidade das tecnologias dos UAV nas diversas inspeções, a REN teve acesso a serviços e demonstrações de diversas entidades com objetivo de verificar a possibilidade de integração desta nova ferramenta. Com este capítulo pretende-se complementar as demonstrações prestadas com uma análise de custo-benefício face aos métodos convencionais.

As demonstrações prestadas basearam-se em analisar a possibilidade de integrar estes serviços nas inspeções, ou seja, consistiram em analisar se os dados obtidos nas inspeções com UAV cumprem com os requisitos destas inspeções. Neste âmbito, o presente capítulo complementa esta análise com os fatores temporais, económicos e de segurança envolvidos nas inspeções.

Entre as inspeções prestadas, as demonstrações mais recorrentes são as com recurso a UAV de asa rotativa, no âmbito de inspeções mais pormenorizadas em ativos verticais, nomeadamente ao cargo de diversas empresas prestadoras destes serviços.

Nas aplicações dos UAV de asa fixa em ativos lineares, apenas foi prestado uma demonstração, no entanto, a Delair apresenta uma forte presença nos congéneres internacionais, tendo experienciado inúmeros quilómetros de voos, especialmente voos fora da linha de vista (BVLOS). Com isto, de seguida irão ser apresentados os casos descritos.

Resumidamente, as demonstrações mencionadas incluem inspeções de pormenor, de isoladores compósitos e de corrosão e, no caso das demonstrações de asa fixa, mapeamento de vãos e determinação de distâncias entre o solo e as linhas.

Demonstração Inspeção de Pormenor

A demonstração de uma inspeção de pormenor consistiu na recolha de imagens com alta resolução no que concerne ao detalhe dos vários elementos de um apoio, com especial incidência nos isoladores.

Esta inspeção é de especial relevância pois demonstra a forte capacidade de detalhe obtido pelo sistema a que recorreram, apresentado na figura 66. O sistema em questão trata-se de um UAV M600 da DJI equipado com o sensor Zenmuse Z30.



Figura 66 – UAV recorrido na demonstração de pormenor (DJI Matrice 600) (fonte: REN)

Como se pode observar nas figuras 67, o sistema consegue capturar as gravuras e etiquetas presentes nos diversos elementos do ativo. Isto é útil pois em certos casos, para além de verificar a existência de defeitos, consegue também identificar as especificações do elemento com defeito necessárias para o processo de manutenção. Nas figuras 67 são apresentados alguns dos defeitos registados nesta demonstração.



Figura 67 – Pormenores detetados na demonstração de inspeção de pormenor (fonte: REN)

Demonstração Compósitos

Uma das aplicações de UAV de asa rotativa é na inspeção de isoladores compósitos. Esta demonstração tinha como referência a deteção de pontos brancos, anomalia frequente e de relevante importância na monitorização dos compósitos e recorreram ao típico DJI M210 acoplado com os sensores Zenmuse Z30 e FLIR XT para esta demonstração.

Durante a inspeção, para além dos pontos brancos foram detetadas outras anomalias nos apoios, nomeadamente sujidades nos isoladores, pontos pretos, oxidação e deformações nos diversos elementos do apoio. As figuras 68 apresentam os principais defeitos encontrados nos apoios.

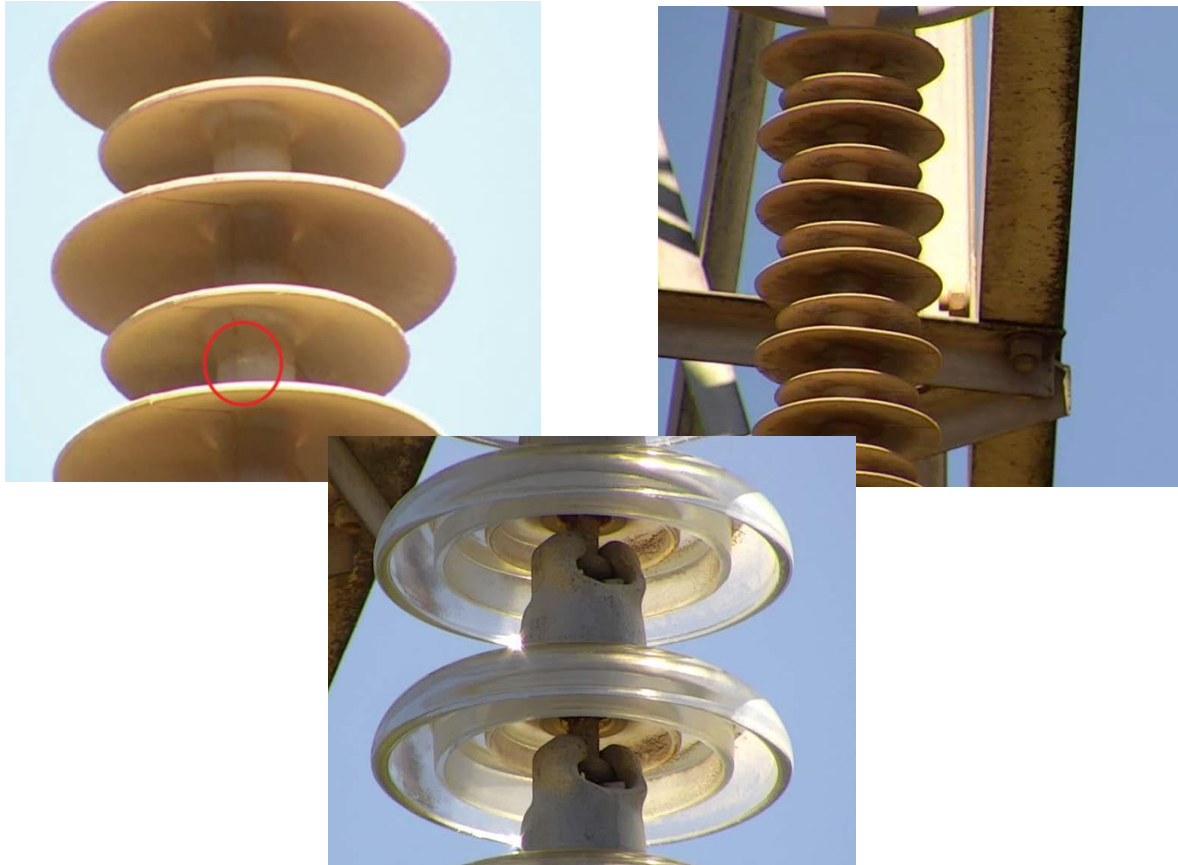


Figura 68 – Defeitos detetados em isoladores, nomeadamente pontos brancos, isoladores compósitos deformados e sujidade em isoladores de vidro (fonte: REN)

Devido à presença das mais diversas anomalias, a identificação dos pontos brancos é dificultada pelas características visualmente semelhantes a certos defeitos. Assim, a catalogação dos pontos brancos não é totalmente efetiva. Por isso, conclui-se que para uma melhor inspeção dos apoios, este procedimento deverá ser adequado, identificando critérios mais determinantes na deteção das respetivas anomalias e exigindo mais tempo e pormenor na inspeção. Por exemplo, a incidência do sol nos apoios e a presença de sombras pode dificultar a deteção das anomalias, sendo necessário definir as datas e os ângulos mais adequados para um levantamento mais pormenorizado. A figura 69 exemplifica esta

dificuldade de recolher imagens com qualidade, em contraluz ou em situações com sombras.

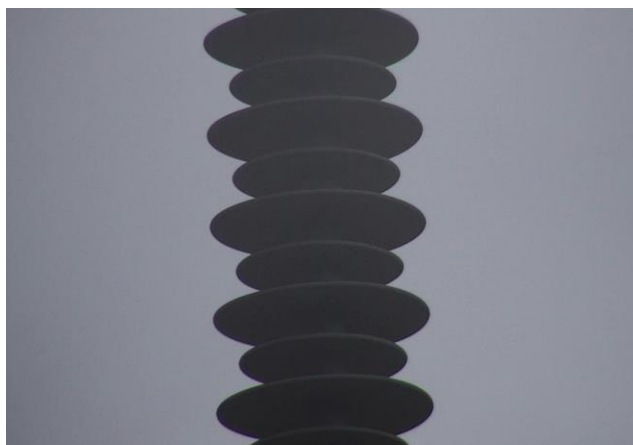


Figura 69 – Qualidade da imagem recolhida em contraluz (fonte: REN)

Assim, previamente às inspeções com UAV, os procedimentos deverão ser mais concisos, nomeadamente na definição dos troços com maior probabilidade de presença dos respetivos defeitos e de critérios mais determinantes na diferenciação dos mesmos.

Demonstração Termográfica

Apresenta-se agora uma demonstração conjunta de inspeção visual e termográfica a condutores e respetivas uniões de cabos com o objetivo de detetar pontos quentes nestes elementos.

Após a inspeção não foram detetadas quaisquer anomalias elétricas, embora a causa da extrapolação não apresentar anomalias possa ser devido aos equipamentos e metodologias a que recorreram.

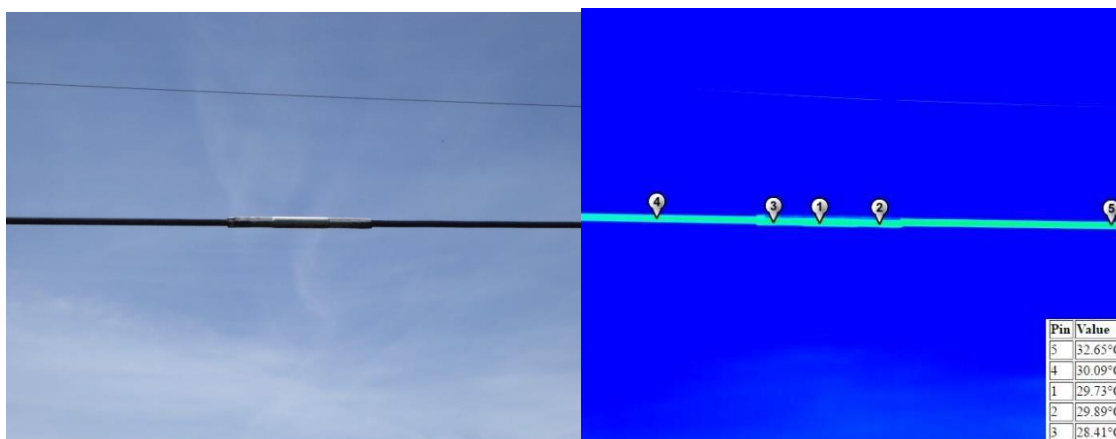


Figura 70 – Demonstração Termográfica numa união e respetiva temperatura (fonte: REN)

Como se pode ver pela figura 70, a maioria das inspeções incluíram apenas um cabo ou união. Isto dificulta o processo de análise termográfica pois não lhe corresponde nenhum termo de comparação, ou seja, a inspeção deveria de incluir as diferentes fases ao aumentar a distância aos cabos, comprometendo assim a precisão dos resultados extrapolados. Entre isto, a estabilidade do UAV utilizado compromete a precisão dos resultados, apoiando assim a vantagem da aquisição do UAV proposto pela DJI (M210 RTK).

Demonstração Asa Fixa

Até à data, a demonstração de asa fixa consistiu num voo com extensão de 2,8 km sobre 8 apoios em apenas 5 minutos. O objetivo desta demonstração era identificar e contabilizar as nidificações de cegonha presentes nos apoios da respetiva linha, a medição de distâncias e identificação de eventuais interferências dos obstáculos do solo nas linhas.

Durante o voo foram processadas 188 imagens, permitindo três vistas por apoio (vertical e oblíqua norte e sul) de forma a identificar mais facilmente os ninhos nos apoios, como exemplificado na figura 71.

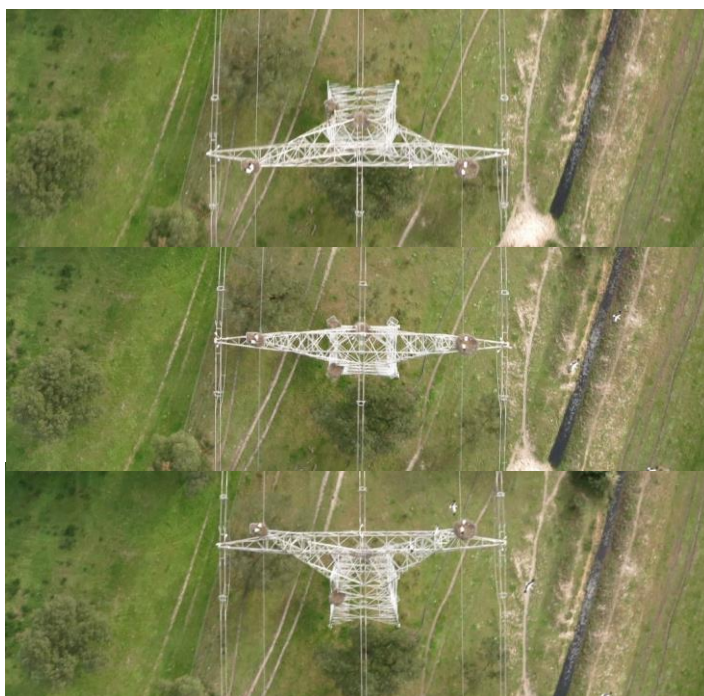


Figura 71 – Demonstração de asa fixa na identificação da nidificação de cegonhas (fonte: REN)

Estas vistas são então aproveitadas para obter a fotogrametria do corredor de modo a medir a elevação da vegetação face às linhas. Na figura 72 pode se observar a qualidade da fotogrametria realizada e o nível das interferências da vegetação representadas a cores diferentes.

Mais à frente serão apresentados alguns casos da forte presença da Delair nos TSO europeus no intuito da tipologia de asa fixa no âmbito da medição de distâncias e mapeamento digital da rede desses congêneres.

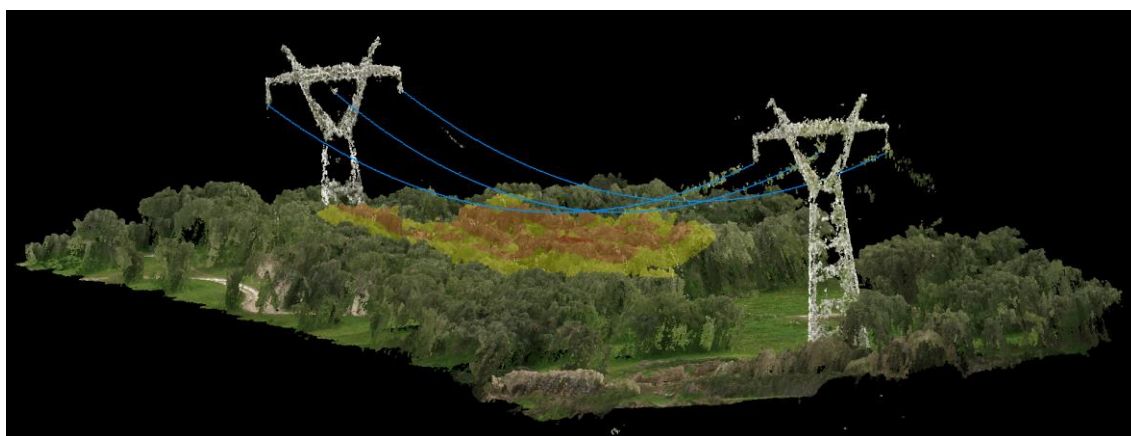


Figura 72 – Processamento Fotogramétrico do levantamento representado na figura 71 (fonte: REN)

Serviço Prestado Inspeção de Corrosão

As demonstrações anteriormente descritas serviram como base e referência para a efetiva prestação de serviços no âmbito das aplicações de UAV nas inspeções. Desta forma, as prestadoras de serviços conseguem realizar as inspeções de forma mais eficaz segundo as soluções e especificações definidas após a análise das demonstrações.

Com base nas demonstrações visuais de pormenor, um dos serviços prestados foi no âmbito da avaliação do estado corrosivo de 21 apoios recorrendo ao M210 RTK equipado com o sensor ótico Zenmuse Z30.

Novamente, este sistema é indicado para este tipo de inspeções devido à sua capacidade de estabilidade e zoom, capaz de identificar com detalhe o tipo de corrosão presente em cada apoio. Nas figuras 73 estão exemplificados algumas das corrosões capturadas.



Figura 73 – Pormenores de uma inspeção de corrosão (fonte: REN)

Nível corrosão	Linha	Apoio	Data inspeção
B	LPA.PM1	48	13/11/2019
B	LPA.PM1	49	13/11/2019
B	LPA.PM1	50	15/11/2019
C	LPA.PM1	51	15/11/2019
D	LPA.PM1	53	15/11/2019
D	LPA.PM1	54	15/11/2019
B	LPA.PM1	55	16/11/2019
B	LPA.PM1	56	16/11/2019
C	LPA.PM1	58	16/11/2019
D	LPA.PM1	59	16/11/2019
C	LPA.PM1	60	25/01/2020

Após este levantamento, foi realizado um relatório de avaliação do estado corrosivo destes apoios, segundo a classificação definida pela REN. Pode-se considerar que este serviço foi de sucesso pois no relatório é evidente que um especialista em corrosão consegue seguramente avaliar o estado corrosivo dos apoios através das imagens capturadas pelo UAV, no entanto e como se pode verificar pela figura 74 a missão de levantamento aéreo prolongou-se por mais tempo do que o desejado.

Figura 74 – Amostra dos resultados da inspeção de corrosão (fonte: REN)

Isto deve-se às condições atmosféricas adversas que dificultam a mobilização da equipa técnica ao local da inspeção e aumentam o risco da operação dos UAV. No entanto, permite-nos concluir que num dia de trabalho se consegue observar com detalhe cerca de quatro apoios. Futuramente, os processos das inspeções de corrosão deverão ser revistos de forma a inspecionar o maior número de postes num dia de trabalho.

Serviço Prestado Inspeção Compósitos

Consolidando as demonstrações de pormenor com as de compósitos, este último serviço prestado teve novamente como referência a presença de pontos brancos na inspeção dos isoladores compósitos recorrendo também ao M210 RTK acoplado com o sensor ótico Zenmuse Z30.

Estes trabalhos evidenciam a capacidade de detetar as falhas nas linhas para além das referenciadas para o trabalho, com grande detalhe devido ao equipamento topo de gama a que recorrem. Certos defeitos, ainda que possíveis de observar do solo, são agora mais facilmente registados. Por outro lado, os UAV permitem observar detalhadamente os pontos brancos que, devido à sua pequena dimensão, não são identificáveis do solo.

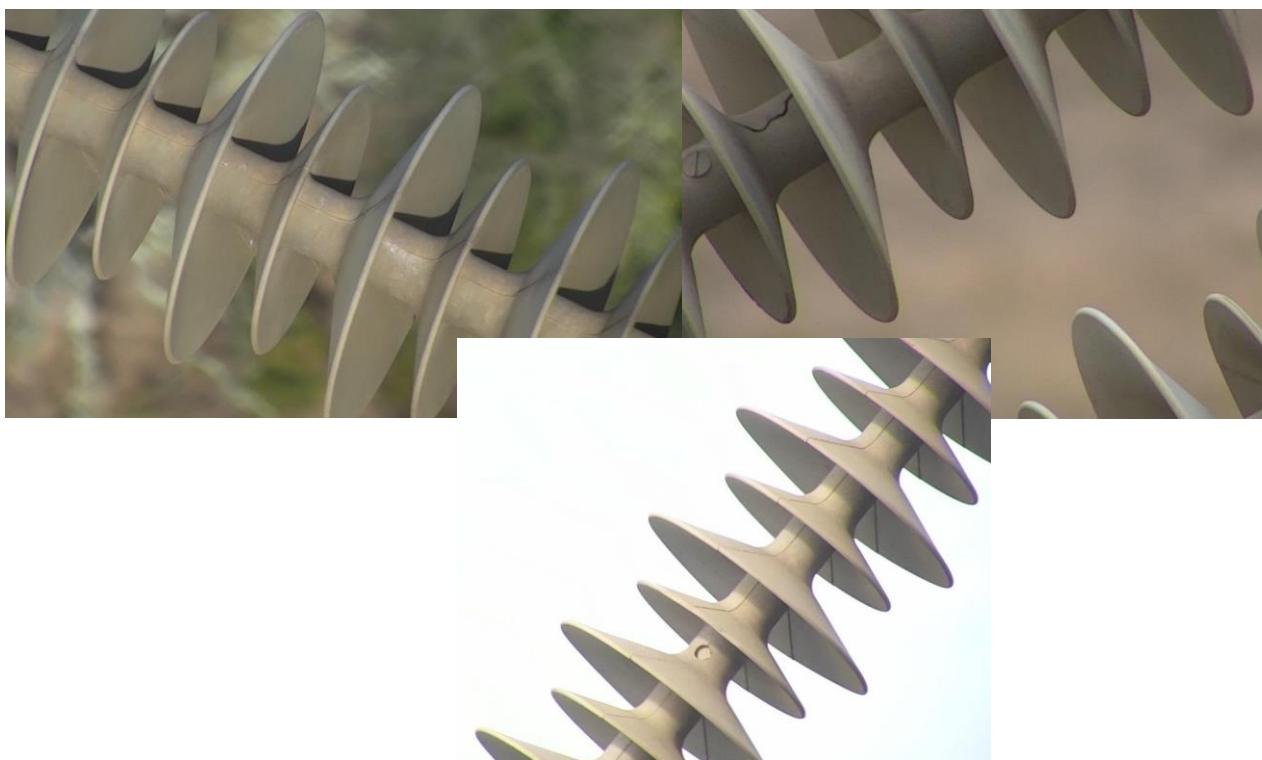


Figura 75 – Resultados da inspeção a isoladores compósitos (fonte: REN)

Os defeitos identificados nesta inspeção (figura 75) são de importante deteção pois podem apresentar perigo aos apoios, de modo que podem quebrar o isolamento da linha e prejudicar o bom funcionamento da mesma ou até colocar em causa incêndios e vidas humanas. Assim, conclui-se que o sistema UAV utilizado permite identificar estas anomalias, sendo que por vezes não seriam detetáveis do solo ou do helicóptero, devido à flexibilidade de posicionamento do UAV para se enquadrar nos melhores ângulos.

4.1.5. CASOS EM CONGÉNERES INTERNACIONAIS

Ao contrário das demonstrações em Portugal, internacionalmente a Delair é uma das principais entidades que desenvolve soluções nomeadamente de asa fixa para mapeamento de grandes áreas devido à autonomia suficiente que estes conseguem obter mesmo quando incorporados com sensores robustos de LiDAR ou fotogrametria.

A ideia surgiu com a crescente necessidade de tornar as inspeções das infraestruturas lineares mais eficazes, recorrendo a UAV mais pequenos capazes de percorrer longas distâncias. Com experiência em mais de 800 000 km de voos [79], estes foram reconhecidos como os primeiros habilitados a realizar voos BVLOS, a principal vantagem desta tipologia, graças à grande autonomia das suas soluções.

O Delair DT18 foi a primeira solução a obter esta certificação em 2012 e desde então que a Delair usufrui desta vantagem prestando serviços a certas operadoras de rede internacionais. Sendo uma entidade francesa, apresenta o principal foco nos serviços públicos franceses, desde linhas elétricas a construções de gasodutos.

Estas demonstrações permitem verificar a aplicabilidade dos UAV de asa fixa visto que os resultados dos voos se confirmam viáveis. Numa das maiores operações na Europa, no âmbito de cobrir 500 km de linhas de distribuição, o DT18 conduziu 3 500 km e 56 horas de voo BVLOS, concluindo a missão em 19 dias úteis [79], [90]. O exemplo do resultado pode ser observado na figura 76. Mesmo em condições meteorológicas adversas, com pouca iluminação e céu nebuloso, as operações podem não ser afetadas devido à baixa altitude em que estes operam obtendo precisões acima das exigidas.

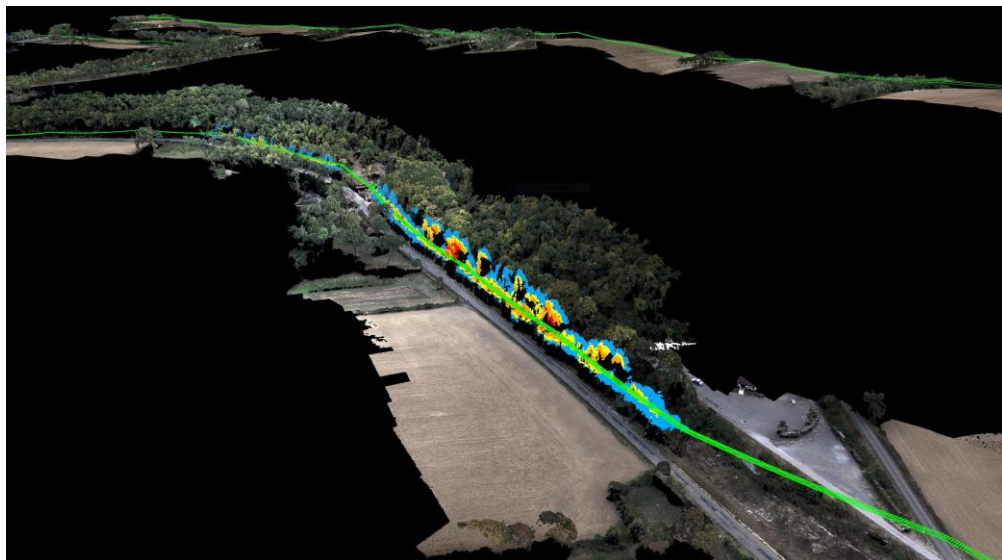


Figura 77 – Resultado da demonstração da Delair perante a ENEDIS (França) [90]

O DT18 é indicado para mapeamento fotogramétrico. Para soluções LiDAR, o mais recente robusto DT26 apresenta tantas aplicabilidades como o DT18. Em termos técnicos, ambos são relativamente semelhantes e permitem as mesmas condições de voos, no entanto, o que distingue é a solução pretendida – fotogrametria ou LiDAR – que influencia a dimensão e o peso do UAV. No entanto, para a RTE, a operadora de transporte de energia da França, esta solução é a indicada para os seus requisitos da densidade da nuvem de pontos [91]. Os objetivos desta entidade são semelhantes ao da REN, uma vez que escolhem esta demonstração para verificar a monitorização do crescimento da vegetação sob as linhas elétricas. Na figura 77 temos a preparação do DT26 para realizar o levantamento aéreo junto da RTE.



Figura 76 – RTE e Delair: mapeamento LiDAR recorrendo ao DT26 [91]

A Islândia é exemplo destas duas aplicações, numa missão localizada em duas áreas distintas recorrendo às duas tecnologias e respetivos UAV. A primeira parte da missão consistiu em mapeamento fotogramétrico de 70 km lineares (figura 78) e a segunda revelou a primeira representação LiDAR realizada na Islândia. A missão foi concluída em apenas 10 e 2 voos, respetivamente [92].

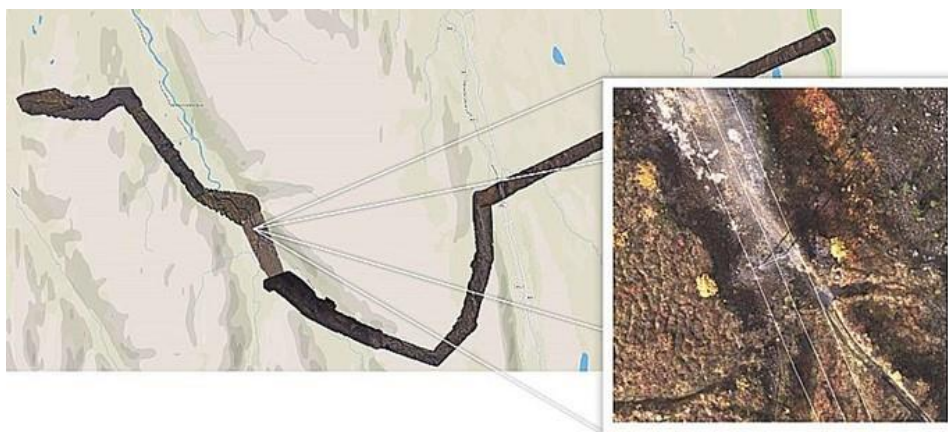


Figura 78 – Demonstração de mapeamento da Delair na Islândia [92]

Entre estes, outros TSO já testaram estas aplicabilidades, nomeadamente na Bélgica e até fora das fronteiras europeias, na China e na Nova Zelândia. Nos Estados Unidos da América, certas inspeções via satélite foram complementadas pelo DT18 de modo a analisar com detalhe as áreas de risco identificadas pelos satélites e definir planos de manutenção [93].

4.1.6. PROJETOS

Num outro aspeto das inspeções, a monitorização da vegetação, os UAV apresentam uma solução de colaboração na gestão florestal e análise de risco de incêndios, enquadrando-se assim em dois dos principais problemas da gestão da rede.

O principal objetivo desta solução é utilizar as infraestruturas verticais da REN para a monitorização da floresta e da evolução de incêndios florestais, implementando um sistema integrado de vigilância que podem funcionar como bases para UAV (figura 79), permitindo-lhes levantar destes locais e realizar rotas pré-programadas ou por solicitação remota.

No âmbito da monitorização da vegetação, com o apoio da Delair, a solução de asa fixa poderá complementar esta gestão de risco ao mapear a rede ou os troços mais críticos permitindo assim atualizar o crescimento da vegetação nas plataformas de gestão da REN e tomar decisões com base em dados mais recentes e detalhados. Esta opção será considerada na análise financeira da aplicabilidade dos UAV na RNT.



Figura 79 – Sistema integrado de vigilância e base para UAV (fonte: REN)

Afastando agora do âmbito das abrangentes aplicações dos UAV nos ativos verticais é do interesse da REN outras funcionalidades, nomeadamente a inspeção de outras infraestruturas elétricas, caso das subestações.

Este projeto propõe evitar a deslocação de pessoal às subestações ou apoiar a operação, a manutenção e monitorização, situações de emergência e rotinas de leitura de instrumentação.

A aplicabilidade dos UAV nas subestações inclui a determinação das condições atmosféricas favoráveis, das interferências dos campos eletromagnéticos (no voo, no envio de informação e transmissões “live”) e de mecanismos de anti colisão para não corresponder riscos à instalação. Posto isto, as diversas instrumentações de levantamento aéreo enquadram e complementam as inspeções em subestações, com custos reduzidos como se irá averiguar.

4.1.7. OUTRAS FUNÇÕES DISPONÍVEIS

Para além das tão mencionadas inspeções aéreas com recurso a UAV, estes apresentam outras funcionalidades mais específicas e pontuais, mas que merecem ser mencionadas pois enquadram-se na concessão e manutenção dos ativos.

São exemplos a passagem de guias para tração de cabos condutores, a colocação de BFDs e a limpeza das linhas.

Para tracionar os cabos condutores ou de guarda nos apoios das linhas é necessário a colocação de guias que por sua vez elevam e fixam os cabos. Este processo é tradicionalmente realizado recorrendo a helicópteros ou guas com grandes custos associados.

Assim, em certas situações surge a possibilidade de implementar UAV para elevar estas guias levando a benefícios de custos e segurança nestas operações. No entanto, são impostas várias dificuldades para uma operação funcional, principalmente a capacidade de payload limitada que os UAV apresentam. Isto implica que a guia utilizada seja mais fina e leve, mas forte o suficiente para elevar os cabos. Devido às características desta guia, a tração de cabos recorrendo a UAV requer um processo intermédio de elevar outra corda, mais forte e robusta, que por sua vez irá puxar e fixar o cabo condutor. Com isto, ao contrário do procedimento tradicional, a operação requer mais tarefas adicionais, no entanto os UAV permitem fazê-lo mais rapidamente sem apresentar grandes riscos de segurança, pois só precisam de fixar a primeira guia fina e leve que se enquadra no seu payload [94], [95].

Nas figuras 80 podemos observar um drone puxando a guia inicial e outro colocando a guia na roldana de elevação de cabos.

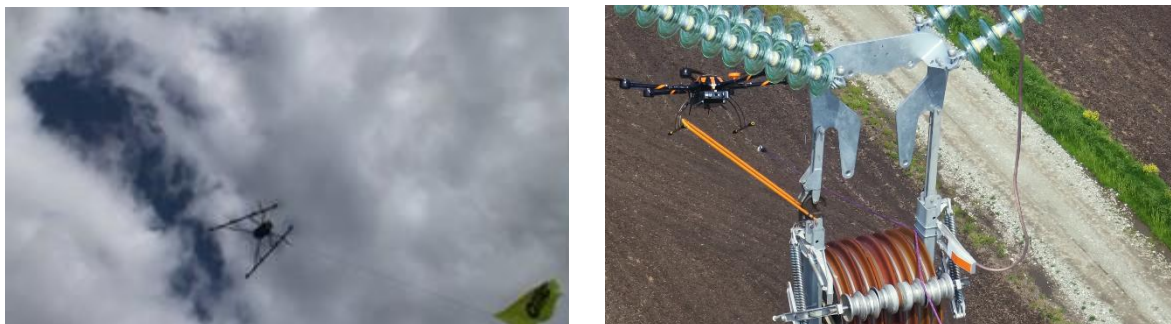


Figura 80 – Colocação de guias para tração de cabos condutores recorrendo a drones [94], [95]

Uma outra aplicação é a colocação de sinalização ou outros acessórios nos cabos, nomeadamente sinalização para avifauna (BFD). Em certas zonas referenciadas pela migração de aves é necessário colocar este tipo de dispositivos para aumentar a visibilidade dos cabos e evitar o embate das aves nos mesmos. Assim surge um sistema integrado nos UAV (designado por “braço de instalação” representado na figura 81) que permite a colocação pontual de acessórios que, quando junto do cabo, o acessório solta-se do braço por uma força ascendente e fixa-se no cabo [96], como ilustrado na figura 81.

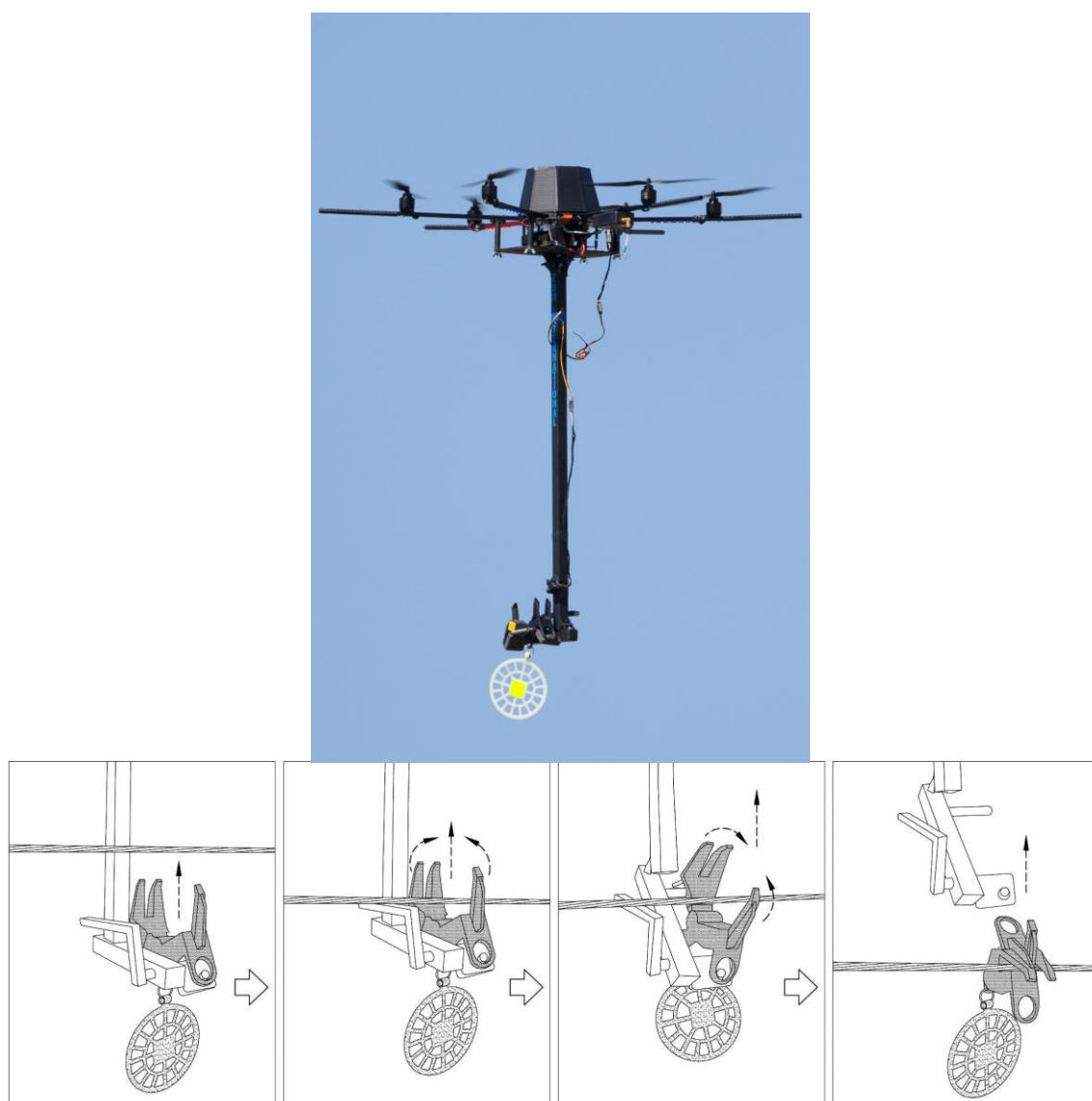


Figura 81 – Mecanismo e processo de colocação de BFD [96]

Por fim, uma aplicação mais extrema, mas com grandes vantagens funcionais será a integração de payloads mais complexos, nomeadamente lança-chamas ou jatos de água, para a limpeza dos diversos ativos [97], [98]. O primeiro pensado para remoção de plásticos ou outros detritos presos nas linhas e o segundo já é frequentemente aplicado na limpeza de pás de turbinas eólicas. Estas funcionalidades estão apresentadas nas figuras 82 e 83, respetivamente.



Figura 82 – Limpeza de plásticos através de um lança-chamas com recurso a UAV [97]

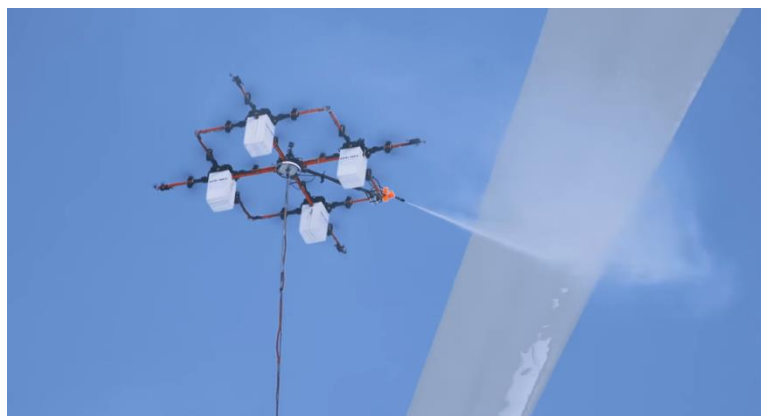


Figura 83 – Limpeza de infraestruturas com recurso a UAV [98]

Todas estas inovações, desde as mais diversas inspeções a funcionalidades mais práticas, reforçam a vantagem da aquisição de UAV para complementar a gestão da extensa rede nacional e dinamizar certas metodologias de carácter conservador, não comprometendo a fiabilidade da rede e reduzindo os custos das operações e riscos humanos associados às tradicionais missões de helicópteros, riscos estes exemplificados na figura 84.



Figura 84 – Riscos humanos e infraestruturais dos trabalhos das metodologias tradicionais [96]

4.2. ANÁLISE QUANTITATIVA

Para terminar a análise e confirmadas as questões de aplicabilidade e segurança das operações, de seguida será apresentada uma estimativa económica que compreende a desagregação dos custos e do tempo de três metodologias (Helicóptero (HC), Solução de Asa Rotativa (RT) e Solução de Asa Fixa (FX)) no âmbito das inspeções aéreas da rede nacional de transporte. Pretende-se comparar os custos das atuais inspeções aéreas com as estimativas combinadas (RT+FX) dos dois designs de modo a que se considerem os mesmos serviços (Inspeção Visual (IV), Inspeção Termográfica (IT), Medição de Distâncias (IMD) e Cópia Digital (COSREN)).

O método desta análise consiste no desenvolvimento de estimativas do desempenho das operações das três ferramentas em questão e aplica-las em cenários de dimensões distintas. Perante estes cenários, gera-se uma discussão que pretende idealizar cenários de aplicabilidade, que analisam e confirmam os resultados das dimensões estudadas, isto é, analisar-se-á a disponibilidade do mercado dos UAV em situações de emergência, na totalidade da rede e soluções no âmbito da aquisição das ferramentas.

Com isto, as atuais metodologias de inspeção aérea recorrem a helicópteros que percorrem até 250 km por dia. São, por este motivo, ferramentas que inspecionam grandes distâncias,

como o caso de linhas elétricas, em pouco tempo e por isso, este serviço é um contrato habitual por parte da REN. No entanto, estes apresentam custos acrescidos de deslocação (ou *transfer*), de descolagem e de combustíveis. Por isso, o concurso deste serviço já inclui 2000€ iniciais por inspeção, que cobre estes aspetos. No final, este serviço apresenta um orçamento de 42,5€/km [99], sendo que 34,5 €/km correspondem a custos de equipa e de serviço. Estes valores representam o orçamento da inspeção da totalidade da rede num período contratual de três anos, pois inspeções mais curtas, como serviços de emergência, têm um custo acrescido.

Na tabela 11 serão ilustrados os aspetos que caracterizam as inspeções aéreas atuais.

Tabela 11 – Características da Metodologia dos Helicópteros [99]

Tempo da Inspeção	
Autonomia	250 km/dia
Custo da Inspeção	
Transfer	2000 €/dia
	8-40 €/km
Equipa e Processamento	34,5 €/km
Custo Unitário	42,5 €/km

Por outro lado, os UAV de asa rotativa não possuem a capacidade de percorrer as distâncias dos helicópteros, mas permitem realizar inspeções visuais e termográficas mais pormenorizadas do que os outros.

Para isso, a equipa terá que se deslocar pelo solo e despende tempo acrescido em cada apoio para preparar e avançar com a operação. Assim, parte dos custos associados são similares às atuais rondas terrestres (38 €/km) [100] e as operações podem durar uma hora por apoio, contando com dois voos distintos. Como referido várias vezes, os custos associados às operações dos UAV são reduzidos, especialmente comparando com os helicópteros. Assim, considerar-se-á que anualmente, a operação e a manutenção

representam 2% e 25% do investimento do UAV, respetivamente [101], [102]. Na tabela 12 são ilustradas as características da inspeção de asa rotativa que permitem determinar o custo que substitui metade dos serviços dos helicópteros (IV e IT).

Tabela 12 – Característica da Metodologia dos UAV de Asa Rotativa

Tempo da Inspeção	
Deploy	10 min.
Transfer (entre postes)	10 min.
Inspeção Pormenor (2 voos)	40 min.
Autonomia	5 apoios/dia (ou 3 km/dia)
Custo da Inspeção	
Equipa e Deslocação	38 €/km
Custo Operacional (2%)	3,2 €/km
Custo Manutenção (25%)	12,1 €/km
Processamento Imagem	3 €/km
Custo Unitário	56 €/km
Custo por apoio (dois apoios por quilómetro)	28 €/km

Complementando a anterior, as soluções de asa fixa têm a capacidade de percorrer longas distancias, possibilitando o mapeamento pretendido dos restantes serviços (IMD, COSREN). No entanto, a autonomia deste não é comparável à dos helicópteros. Não deixam de ser ferramentas flexíveis, que por sua vez têm custos operacionais (de utilização) reduzidos, e, desbloqueando as operações BVLOS, estes percorrem corredores entre 15 a 20 km. Com isto e, considerando que uma equipa seja capaz de realizar no mínimo dois voos, na tabela 13 será apresentada a estimativa das operações de asa fixa,

considerando custos operacionais superiores pelo risco envolvido nas operações BVLOS [103].

Tabela 13 – Característica da Metodologia dos UAV de Asa Fixa

Tempo da Inspeção	
Autonomia	15 km/voo
	30 km (2 voos/dia)
Custo da Inspeção	
Equipa e Deslocação	4,17 €/km
Custo Operacional (4%)	4,71 €/km
Custo Manutenção (25%)	0,98 €/km
Processamento	6 €/km
Custo Unitário	16 €/km

O custo unitário de cada metodologia corresponde ao somatório dos vários custos desagregados. Desta desagregação, pela figura 85, verifica-se que os principais custos de ambos os UAV se enquadram na deslocação terrestre e na presença da equipa. Estes aspetos influenciam principalmente as soluções de asa rotativa, que despendem mais tempo a deslocar de poste em poste, enquanto que as deslocações de asa fixa são mais longas mas com menos paragens, apenas de 15 em 15 km. Por isso, estes demonstram uma viabilidade superior, já que os custos de operação são reduzidos em ambos.

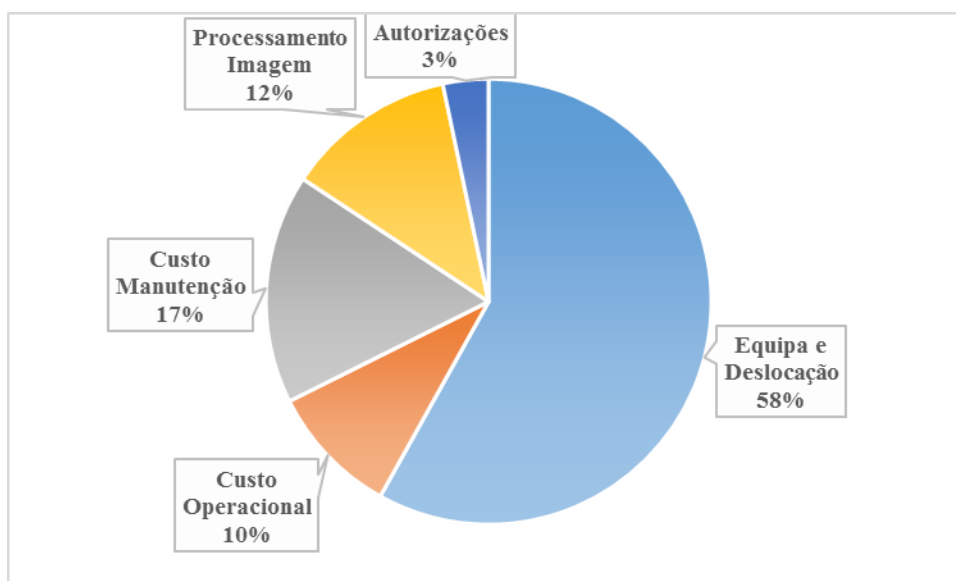


Figura 85 – Desagregação dos custos das operações com UAV

As características temporais das operações com recurso aos UAV estão, de certa forma, desvalorizadas, sendo que com a gestão adequada, tanto a solução de asa rotativa e de asa rotativa terão capacidades de inspecionar mais apoios ou corredores e consequentemente os custos unitários seriam inferiores. No entanto, estas estimativas permitirão verificar o desempenho genérico dos UAV nos cenários apresentados de seguida.

4.2.1. CENÁRIOS

Com base na desagregação e estimativa dos custos envolvidos nas metodologias, de seguida serão apresentados três cenários que visam avaliar o desempenho das estimativas na totalidade da rede, num cenário característico de uma linha e num cenário intermédio.

Cenário 1

No primeiro cenário pretende-se verificar a viabilidade da substituição dos helicópteros na inspeção total da rede, ou seja, cerca de 7400 km de faixa. Neste cenário serão apenas considerados as características de cada metodologia estimadas anteriormente, pois ainda nenhum serviço propôs um orçamento para estas dimensões.

Os resultados dos cenários nas seguintes tabelas apresentam o desempenho de cada solução (RT e FX) e a resultante do somatório destas (UAV RT + FX), que visa comparar os valores onde os UAV representam as mesmas funções que os helicópteros.

Tabela 14 – Resultados Cenário 1 (7400 km)

	Helicóptero¹	UAV (RT+FX)	RT¹	FX¹
Tempo (meses)	2	255	247	8
Custo (€/km)	43	72	56	16
Custo Total (€)	314 500	510 753	416 867	93 887
	62%			

Como se verifica na tabela 14, os UAV apresentam custos acrescidos face ao orçamento atual dos helicópteros. Para além disso, o tempo de toda a inspeção da rede não é comparável devido ao contraste de autonomia dos helicópteros e a deslocação terrestre associada aos UAV, principalmente na metodologia de asa rotativa, que não será capaz de entregar os resultados visuais e termográficos na periodicidade pretendida.

Por outro lado, a solução de mapeamento (FX) consegue ser apenas quatro vezes mais demorada que os helicópteros, apesar da discrepância da autonomia entre estas duas metodologias.

Na tabela 14 verifica-se que as metodologias que visam substituir os helicópteros na totalidade da rede apresentam custos 62% superiores ao orçamento atual.

Cenário 2

No entanto, devido à menor flexibilidade económica de descolagem dos helicópteros em cenários mais curtos, os UAV poderão dar resposta ao custo dos transfers dos helicópteros. Assim, este cenário pretende verificar os orçamentos num cenário de 50 km, equivalente ao comprimento característico de uma linha.

¹ Valores Unitários referentes às tabelas 11, 12 e 13

Tabela 15 – Resultados Cenário 2 (50 km)

	HC	UAV (RT+FX)	RT	FX
Tempo (dias)	1	26	24	2
Custo (€/km)	75	72	56	16
Custo Total (€)	3 725	3 451	2 817	634
	7%			

Pela tabela 15 verifica-se novamente a dificuldade da solução de asa rotativa de se adaptar ao tempo da metodologia atual, devido ao tempo despendido em cada apoio. No entanto, esta metodologia consegue inspecionar detalhadamente cada apoio deste cenário dentro de um mês de trabalho.

Para cenários com estas dimensões é conhecido o orçamento de serviços de helicóptero em situações de emergência, como será considerado mais à frente. No entanto, para uniformizar e para que os cenários sejam mais abrangentes, estimou-se um novo orçamento em função do custo do transfer dos helicópteros, que em distâncias mais curtas tem um peso superior no custo unitário.

Por outro lado, certas entidades apresentaram à REN orçamentos de demonstrações e serviços com ambas as metodologias de UAV. Porém, como se verifica pela tabela 16, que apresenta os valores propostos pelas entidades competentes em serviços com UAV, estes serviços apresentam orçamentos elevados com vista o retorno do investimento e a cobrança do serviço mas que não refletem necessariamente os custos associados a estas operações. Como tal, na tabela verifica-se que, mesmo em cenários mais curtos, estes serviços são 10 vezes mais dispendiosos (tabela 16), apesar da estimativa demonstrar uma redução de 7% face aos custos atuais dos helicópteros neste cenário.

Tabela 16 – Orçamentos propostos pelos serviços de UAV

	Orçamento Unitário (€/km)	Orçamento Cenário 2 (€)
Prestação Serviço Rotativa	144 (por apoio)	17 262
Prestação Serviço Fixa	400	20 000
Orçamento Total das Propostas de Serviços	544	37 262

A comparação da tabela 15 verifica que em cenários de menor dimensão, os UAV apresentam-se mais vantajosos em termos económicos dentro da periodicidade de um mês de trabalho. O tempo do mapeamento deste cenário é equivalente à metodologia dos helicópteros, apesar das distintas autonomias.

Cenário 3

O cenário 3 compreende uma situação intermédia entre a totalidade da rede e uma única linha. Assim, será considerado um cenário com 1400 km de linhas, que poderá corresponder à zona sul nacional. Esta zona, com menos comprimento de linha do que a zona norte e centro do país e com acessos terrestres aos apoios facilitados, será a mais apelativa para a aplicação dos UAV na rede.

Porém e como já foi mencionado, não existe um orçamento UAV real para cenários mais longos, por isso foi necessário adaptar uma nova estimativa (UAV 2) que visa reduzir o lucro das propostas de serviços UAV (da tabela 16) em 60%, a título de exemplo, de modo definir uma proposta de serviço mais credível para cenários mais longos, com base na primeira estimativa (UAV 1) e no orçamento das prestadoras de serviços. Esta estimativa é superior à estimativa inicial (UAV 1), inferior às propostas de serviços e permite assim definir um intervalo onde se enquadram as operações dos UAV.

Os resultados desta nova estimativa estão apresentados na tabela 17.

Tabela 17 – Resultados Cenário 3 (1400 km)

	HC	UAV 1	UAV 2 ²	RT 2 ²	FX 2 ²
Tempo (meses)	6 (dias)	20		18	2
Custo (€/km)	43	72	219	104	115
Custo Total (€)	59 500	96 629	305 535	145 001	160 534
	62%				

Novamente e por este cenário já ter dimensões consideráveis, os custos dos UAV apresentam-se 62% superiores ao atual orçamento dos helicópteros, pela estimativa inicial (UAV 1).

Estima-se que as soluções de asa fixa permitam completar o cenário em dois meses, apesar da solução de asa rotativa não cumprir com a periodicidade das outras metodologias.

A nova estimativa (UAV 2) num cenário destas dimensões é superior ao orçamento dos helicópteros no cenário da totalidade da rede e obviamente superior ao orçamento deste cenário. No entanto, com a nova estimativa foi possível estabilizar o orçamento das prestadoras de serviço e reduzir as propostas das mesmas em cerca de 2 milhões de euros, tornando o serviço externo mais credível, embora ainda não comparável ao orçamento dos helicópteros, como se pode observar pela tabela 18 e figura 86.

A estimativa que surge deste cenário permite determinar o intervalo onde os custos das operações com recursos a UAV se enquadram.

² Estimativa UAV 2 referente à redução de 60% das propostas de serviços UAV apresentados na tabela 16.

Tabela 18 – Resumo dos Resultados dos diferentes Cenários (em €)

	€/km	7400 km	50 km	1400 km
UAV 1	72	510 753	3 451	96 629
UAV 2	219	1 614 970	10 912	305 535
Custo Serviço UAV	544	4 024 490	27 193	761 390
Custo Helicóptero	43	314 500	3 725	59 500

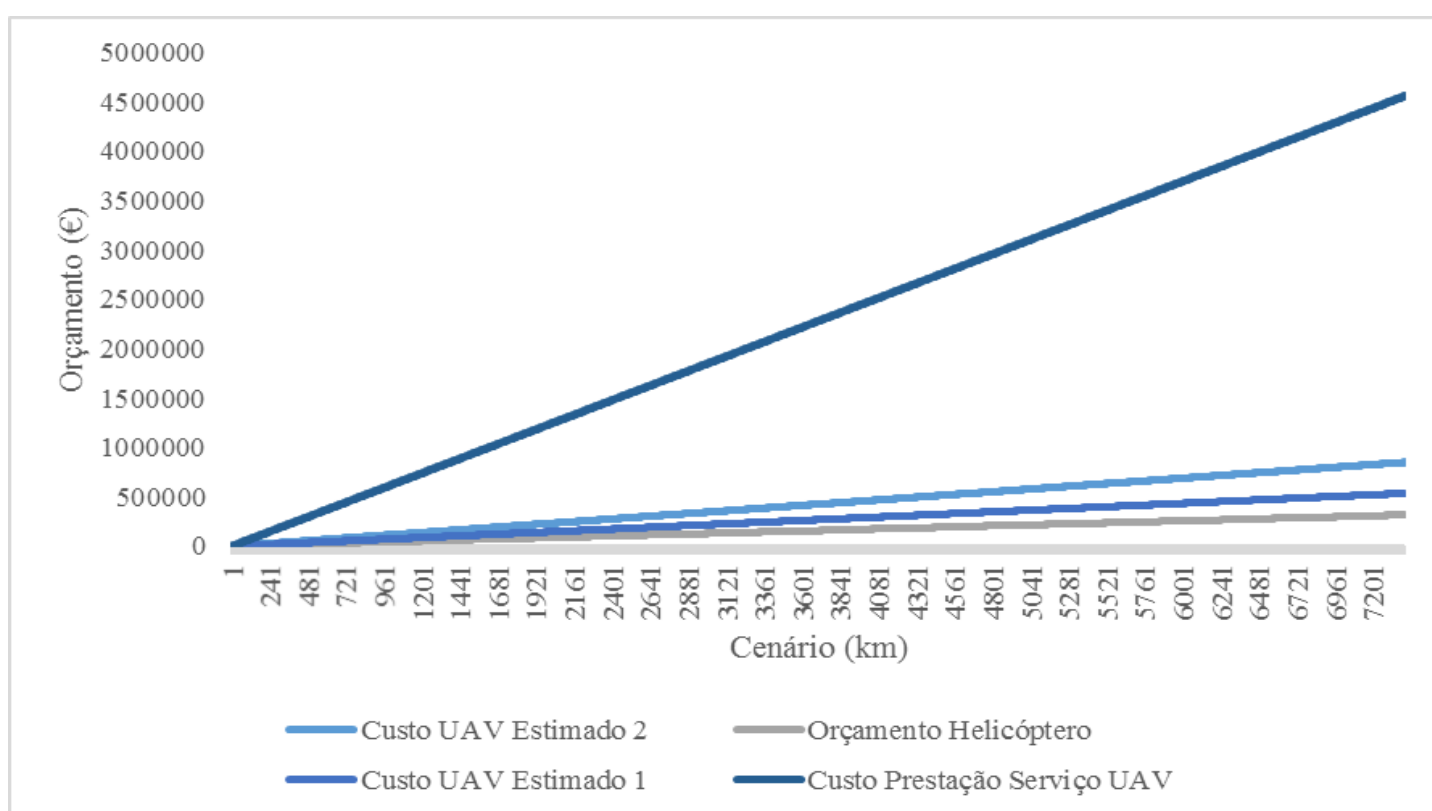


Figura 86 – Desempenho das diferentes estimativas e orçamentos

4.3. ANÁLISE QUALITATIVA

Mesmo sendo uma ferramenta flexível e com custos operacionais reduzidos, pela análise dos diferentes cenários, os UAV aparentam uma viabilidade inferior aos helicópteros, especialmente em cenários de extensos ativos lineares, como se observa pelo espectro das estimativas dos custos das operações dos UAV na figura 87. Aqui, em cenários de menores dimensões, o orçamento dos helicópteros enquadra-se no intervalo das estimativas, enquanto que na totalidade da rede não se verifica esta viabilidade.

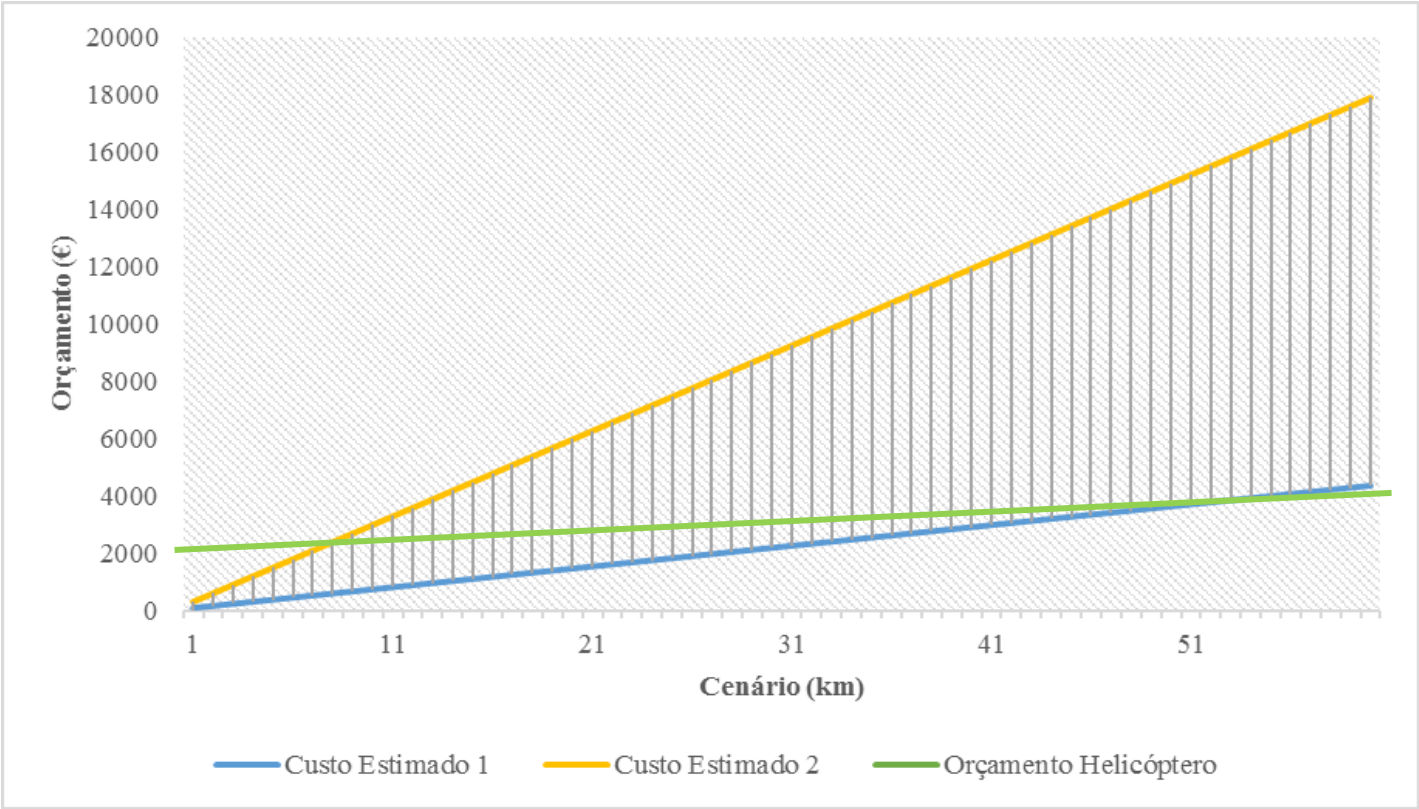
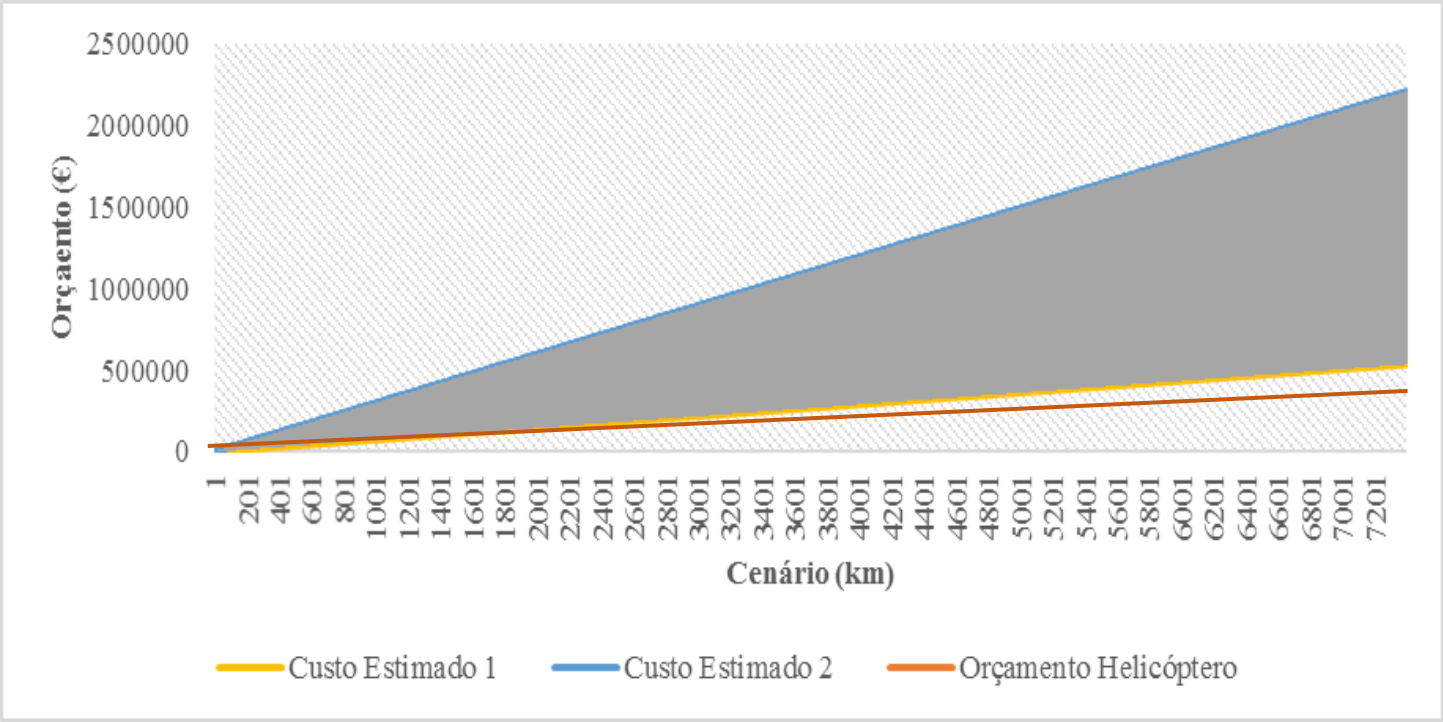


Figura 87 – Espectro dos custos estimados para as operações com UAV em cenários distintos

Apesar disso, determinar-se-á a disponibilidade do mercado dos UAV em função do atual orçamento das diversas inspeções e, no caso da totalidade da rede, verifica-se pela tabela 19 que através da estimativa dos custos dos UAV (UAV 1) apenas seria possível inspecionar cerca de metade do comprimento total das faixas (56% da rede). No entanto, a mesma tabela confirma que as propostas apresentadas pelas prestadoras de serviços não se adequam a cenários mais longos. O conceito da disponibilidade do mercado visa demonstrar o desempenho das estimativas dos UAV em função de um orçamento para determinado efeito.

Tabela 19 – Disponibilidade do Mercado para a Totalidade da Rede

Orçamento Helicóptero	42,5 €/km; 7400 km de inspeção da rede	
	314 500 €	
UAV 1	72 €/km	4 356 km
UAV 2	219 €/km	1 436 km
Custo Serviço UAV	544 €/km	578 km

No âmbito da aquisição dos UAV para a substituição total dos serviços do helicóptero, este conceito apresenta custos acrescidos, como verificado no primeiro cenário. Porém, pode ser fundamental para esta análise caracterizar esses custos de forma a perceber a diferença efetiva entre as duas metodologias.

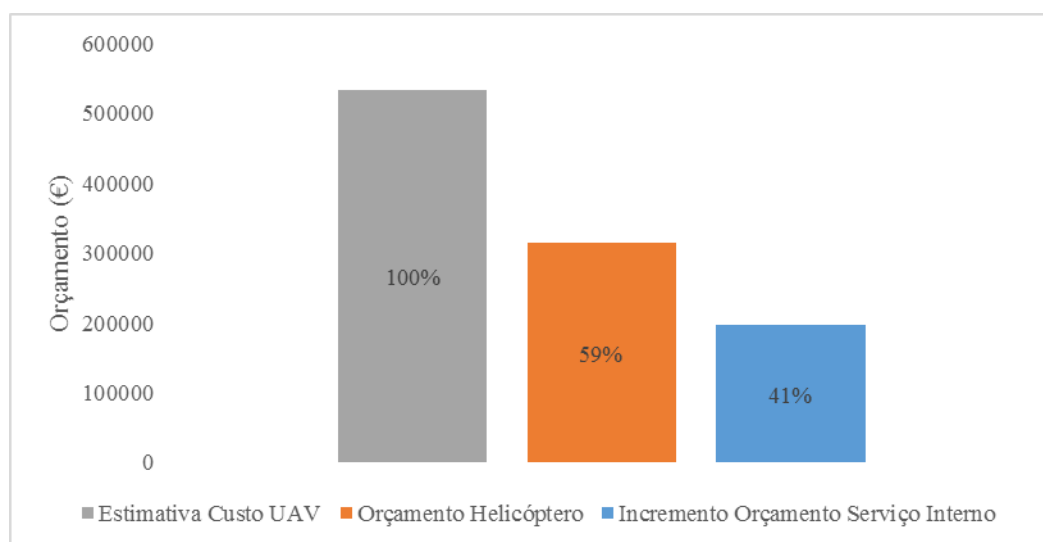


Figura 88 – Custos adicionais na criação de um serviço interno com UAV

Na figura 88 verifica-se que 60% dos custos das operações com UAV na totalidade das linhas corresponde aos atuais custos dos serviços dos helicópteros. A diferença entre as duas está na ordem dos 200 000 €, sendo que esta diferença corresponde ao incremento atual das inspeções. Este incremento corresponde a um aumento de 62% no mesmo, que se traduz num incremento de 30 €/km ao orçamento da metodologia tradicional.

Como visto anteriormente, os serviços de asa fixa podem ser quatro vezes mais demorados que os serviços dos helicópteros, no entanto este consegue cumprir com a periodicidade anual das inspeções. Por outro lado, a inspeção de pormenor e termográfica com a solução de asa rotativa deverá ser realizada nos troços e apoios mais críticos, com uma gestão ativa desta metodologia, nomeadamente na definição de pontos estratégicos, de modo a otimizar o desempenho e atenuar a discrepância temporal da solução de asa rotativa.

A aquisição de ambos os designs representa apenas cerca de 13% do orçamento atual dos helicópteros, ou 8% dos custos estimados para a inspeção total da rede com UAV. Os preços destas ferramentas rondam as dezenas de milhares e considera-se 20 000€ por solução.

Os UAV apresentam grandes custos associados à equipa e deslocação terrestre, como se verifica pela figura 85, sendo o segundo a principal vantagem dos helicópteros sobre os UAV, especialmente nas soluções de asa rotativa, onde não se verifica a periodicidade das inspeções, então o custo não é o único fator da inviabilidade.

Assim, em cenários curtos onde a deslocação terrestre é menor e o transfer do helicóptero tem custos acrescidos, os UAV competem para confirmar a pontualidade em situações de emergência como exemplificado no cenário 2.

No orçamento de inspeções aéreas, a REN conta com 310 km de inspeção rápida (de emergência), com custos na ordem dos 100 €/km [99]. Assim podemos determinar a disponibilidade do mercado face a este orçamento, isto é, qual será o limite da pontualidade dos UAV.

Considerando que a solução de asa rotativa cumpre com os requisitos de inspeção de emergência, na tabela 20 estão representadas as distâncias que a solução do UAV é capaz de inspecionar com base no orçamento de inspeções aéreas rápidas (de emergência).

Tabela 20 – Disponibilidade do Mercado num Cenário de Emergência

Orçamento Helicóptero	100 €/km; 310 km de inspeção rápida	
	31 000 €	
RT	56 €/km	554 km
RT 2	104 €/km	298 km
Custo Serviço RT	300 €/km	103 km

Como se verifica, as propostas de serviço dos UAV apenas disponibilizam a inspeção de 1/3 do cenário de emergência dentro do respetivo orçamento. Do ponto de vista otimista, 100 km de inspeção de emergência pode ser suficiente durante o ano e assim os serviços poderiam enquadrar-se nessa função, visto que por vezes durante um contrato não é necessário recorrer às inspeções rápidas de emergência.

Por outro lado, a aquisição interna de um UAV para este âmbito permite inspecionar o dobro da quantidade de postes dentro do orçamento de emergência da atual metodologia. Sendo que um cenário de emergência não se verifica de uma única vez, a periodicidade da asa rotativa deixa de ser um fator, juntamente com todo o pormenor que esta ferramenta oferece. Isto confirma a pontualidade dos UAV apresentado no segundo cenário e agora analisado na tabela 20.

Assim, durante o período de dois contratos (6 anos), a solução de asa rotativa representa um benefício de 37 000€ (tabela 21) face aos serviços dos helicópteros no âmbito das inspeções rápidas/de emergência. Isto pois, após o investimento do UAV (no primeiro ano), os custos destas operações são reduzidos relativamente ao orçamento de emergência para cenários mais curtos, amortizando este orçamento em cerca de 13 000€ anualmente.

Tabela 21 – Análise Financeira do UAV Rotativa para fins de emergência (310 km)

Ano	0	1	2	3	4	5
Custo HC (€)	31 000	31 000	31 000	31 000	31 000	31 000
Investimento UAV (€)	20 000	-	-	-	-	-
Custo UAV (€)	17 360	17 360	17 360	17 360	17 360	17 360
Cash Flow Atualizado ³ (€)	-39 964	12 868	12 139	11 452	10 804	10 192
VAL (€)	37 456					
TIR (%)	21					
Payback (Anos)	3,32					

Com isto, a inspeção da rede contaria com menos um serviço recorrido aos helicópteros, onde este cenário se verifica benéfico dentro do período analisado.

No âmbito da aquisição destas ferramentas, a REN encontra-se a otimizar a metodologia de gestão de risco, nomeadamente da vegetação. Isto implica a atualização das especificações das inspeções aéreas e do fortalecimento dos serviços que permitem a caracterização do estado da vegetação, isto é, de momento a REN necessita de depender mais nos serviços de medição de distâncias (IMD) e no desenvolvimento e atualização da cópia digital (COSREN) da rede, otimizando assim a gestão de risco envolvida nisto. Este serviço é possível através do varrimento laser e consequente pós-processamento que permite classificar de cada ponto obtido [21], como apresentado nos softwares de processamento.

A aquisição da solução de asa fixa, proposta pela pareceria com a Delair, é suficiente para complementar a gestão de risco que sugere a monitorização do crescimento da vegetação

³ Taxa de Atualização média do setor (6%).

mais regularmente. Com isto, não se pretende eliminar os serviços dos helicópteros, mas sim integrar na gestão da vegetação o mapeamento das soluções de asa fixa.

Tabela 22 – Complemento da Solução de Asa Fixa na Gestão de Risco da Vegetação

Orçamento Helicóptero ⁴	314 500 €
Mapeamento UAV Asa Fixa ⁴	93 887 €
Complemento Gestão de Risco (Orçamento Total)	408 387 €

Assim, na tabela 22 verifica-se um orçamento de aproximadamente 400 000€ para que, no espaço de um ano, se monitorize duas vezes o estado da vegetação, uma recorrendo aos serviços dos helicópteros e a outra ao mapeamento por uma equipa REN com UAV.

Com isto, a segunda representa um incremento de 93 000€ face ao atual orçamento que corresponde a 30% do mesmo. Para esta solução se apresentar viável, a monetarização das necessidades da gestão de risco da vegetação terá que ser superior a 30% do atual orçamento das inspeções.

Como se verifica pela análise financeira da proposta da otimização da análise de risco da vegetação na tabela 23, esta apresenta-se muito mais viável do que o contrato de mais serviços de helicópteros para este efeito, devido aos custos de operação estimados da solução de asa fixa serem muito inferiores.

⁴ Valores referentes ao cenário de 7400 km, apresentados na tabela 14.

Tabela 23 – Análise Financeira do UAV Fixa para fins da gestão da vegetação (7400 km)

Ano	0	1	2	3	4	5
Custo HC (€)	314 500	314 500	314 500	314 500	314 500	314 500
Investimento UAV (€)	40 000	-	-	-	-	-
Custo UAV (€)	93 887	93 887	93 887	93 887	93 887	93 887
Cash Flow Atualizado (€)	-147 970	200 557	182 324	165 749	150 681	136 983
VAL (€)	796 296					
TIR (%)	147					
Payback (anos)	0,74					

Como o incremento da solução de asa fixa corresponde a menos de metade do orçamento dos helicópteros (ilustrado na figura 89), com o dobro deste provavelmente seria possível mapear duas vezes a totalidade da rede apenas com UAV, dentro da periodicidade pretendida, para uma monitorização da rede ainda mais detalhada e mais próxima da realidade do crescimento da vegetação, enquanto que para estes efeitos, se se contratasse um serviço/demonstração de asa fixa, apenas seria possível mapear aproximadamente 800 km. Assim, as prestadoras de asa fixa ficam muito aquém de inspecionar a totalidade da rede. Porém, os 800 km que as prestadoras de serviço oferecem (com o mesmo orçamento dos helicópteros) pode representar as linhas mais críticas, que requerem uma gestão da vegetação mais ativa, ou aproximam-se dos troços com nidificação da cegonha, cuja gestão também recorre a soluções de varrimento laser e fotogramétrico.

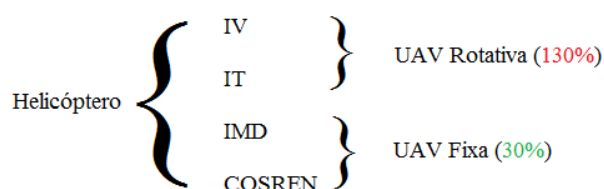


Figura 89 – Equivalência dos custos dos UAV face à totalidade dos serviços dos helicópteros num cenário de 7400 km

Por outro lado, da análise da solução de asa fixa enquadrada na gestão de risco da vegetação, verifica-se que os custos de mapeamento total da rede através de UAV (de asa fixa) são aproximados (e inferiores) aos custos de mapeamento do helicóptero, ou seja, se a substituição integral do helicóptero nas metodologias das inspeções não se apresenta viável, será principalmente pela complexidade das operações de asa rotativa que não se adequam a ativos lineares.

4.3.1. ANÁLISE SUCINTA

Resumindo, com base nas estimativas e análises realizadas anteriormente, a tabela 24 apresenta o espectro de funcionalidades onde se enquadram os UAV, tendo sempre como base a metodologia e os custos dos helicópteros.

Tabela 24 – Quadro Resumo das Funcionalidades dos UAV

	IV	IT	IMD	COS REN	Custo Unitário €/km	Total (7400 km)	Emergência (310 km)	Gestão Vegetação (7400 km)	Autonomia	Tempo Aproximado
HC	V	V	V	V	42 – 74	314 500	31 000	314 500	250 km/voo	250 km/dia
UAV	V	V	V	V	72 - 219	510 753	-	-	-	-
RT	V	V	X	X	57 - 103	416 867	17 360	-	30 min/voo	3 km/dia
FX	X	X	V	V	16 - 114	93 887	-	93 887	1 hora/voo	30 km/dia

Com isto, conclui-se então que os helicópteros são mais vantajosos e eficientes na maioria dos aspetos, sendo que apresentam custos inferiores com autonomias cujos UAV não conseguem competir.

Apesar dos UAV apresentarem custos reduzidos envolvidos na sua operacionalidade/utilização, pelo facto das operações serem rápidas, quase automáticas e não representarem grandes custos adicionais durante a inspeção (como a manutenção associada ao desgaste), estas ferramentas são debilitadas pela deslocação terrestre nos custos e na periodicidade das entregas do levantamento dos UAV. Além disso, são necessárias ambos os designs para apresentarem os mesmos serviços dos helicópteros. No entanto, o avanço tecnológico das ferramentas junto de uma boa gestão das operações poderá verificar a redução da discrepância entre as duas metodologias.

Verifica-se também que o desempenho da disponibilidade do mercado de serviços dos UAV é inferior, quer ao dos helicópteros, quer à aquisição interna das duas ferramentas, seja em cenários de emergência ou na totalidade da rede. Isto significa que o contrato destes serviços só em situações muito pontuais, enquanto a discrepância entre os orçamentos e as estimativas se apresentar tão elevada.

Por outro lado, a aquisição das ferramentas poderá enquadrar outros cenários, propostos neste trabalho, visto que a substituição integral dos helicópteros não será a solução mais indicada, como se verifica no espectro das estimativas realizadas para este âmbito das figuras 87.

As operações otimizadas com base numa gestão detalhada, como por exemplo com a definição de pontos estratégicos e dos troços mais críticos, o intervalo do espectro poderá ser menor e eventualmente competir com os helicópteros na inspeção total da rede.

Em cenários mais curtos, como os de emergência, os UAV são a ferramenta indicada, por possibilitarem inspeções detalhadas e flexíveis necessárias em inspeções pontuais, para além de complementarem outros cenários devido aos seus custos operacionais reduzidos, nomeadamente inspeções apeadas ou inspeções em subestações, que tipicamente não recorrem a metodologias de inspeção aérea.

Embora as propostas apresentadas pelos serviços dos UAV serem superiores às estimativas desta análise, no limite poderão enquadrar cenários de emergência.

A aquisição interna da solução de asa fixa possivelmente complementa a gestão de risco da vegetação, dentro da periodicidade pretendida e com orçamento inferior à contratação de múltiplos serviços de helicóptero com o mesmo âmbito.

Assim, após toda esta análise pode-se concluir que a substituição integral dos helicópteros não será viável, mas cada solução de UAV enquadra-se noutros aspetos das metodologias das inspeções aéreas. Os UAV de asa rotativa enquadram situações pontuais ou de emergência, por exemplo em subestações ou reinspecções a postes onde foram detetadas anomalias, respetivamente, e as soluções de asa fixa complementam a gestão de risco com uma monitorização mais detalhada do crescimento da vegetação. Enquanto isso, os helicópteros continuam a inspecionar na íntegra a totalidade da rede.

Para terminar, todo este capítulo e o capítulo do estado da arte permitem retirar vários aspetos a favor dos UAV, provavelmente já mencionados e agora evidenciados:

- Normas regulamentares em revisão e atualização;
- Tecnologias de segurança e controlo substituem as atuais técnicas de aviação;
- Risco envolvido nas operações reduzido (sem risco humano);
- Designs diferentes permitem aplicações diferentes;
- Avanço tecnológico das soluções UAV e respetiva instrumentação, evidente no mais recente M300 da DJI;
- Entidades dominam o mercado dos UAV profissionais (DJI, Delair);
- Parcerias de instrumentação e de softwares de processamento, adaptados ao levantamento UAV;
- Hardware dos UAV vencem as restrições regulamentares, operacionais e ambientais identificadas;
- Habilitados a operações especiais como operações além da linha de vista (BVLOS);
- Operações automáticas de uma gestão prévia;
- Custos operacionais reduzidos;
- Flexibilidade de deploy;

- UAV de asa rotativa indicado para situações pontuais ou de emergência. UAV de asa fixa enquadra o mapeamento da totalidade da rede;
- Fora as propostas apresentadas, a pontualidade em conjunto com os baixos custos operacionais complementa diversas outras aplicações, que geralmente não recorreriam a inspeções aéreas;
- Flexibilidade dos voos dos UAV permitem inspecionar certos ativos e ângulos que nem a inspeção a pé nem o helicóptero de momento conseguem fazer.

Da mesma forma, a aplicabilidade dos UAV na RNT poderá apresentar certos riscos económicos e operacionais que levarão a optar por manter as metodologias atuais:

- Grandeza de aquisição na ordem das dezenas de milhares de euros;
- Sem riscos humanos, mas riscos de danos a terceiros e perda total do UAV;
- Nem todo o mercado apresenta as soluções tecnológicas de navegação e controlo;
- Nicho de mercado controlado por poucas entidades, limitado às que apresentam as soluções com melhores tecnologias;
- Qualidade da instrumentação inferior à acoplada aos helicópteros;
- Estas ferramentas representam um recente avanço tecnológico e por isso os dados técnicos disponíveis são limitados, limitado às demonstrações existentes;
- Prestadoras de serviço com orçamentos elevados, superiores às estimativas realizadas nesta análise;
- Autonomia inferior aos helicópteros embora os custos em função da distância percorrida sejam superiores;
- Custos das inspeções depende principalmente da deslocação terrestre envolvida nas operações com UAV;
- Periodicidade das entregas inferior aos helicópteros, em especial nas soluções de asa rotativa também influenciada pela deslocação terrestre entre apoios.

- Desempenho dos helicópteros muito superior em cenários lineares de grandes comprimentos, como é o caso da extensa rede elétrica da REN.
- Gestão prévia complexa, suportada de um know-how interno.

Assim, estes são os principais aspetos que influenciam a tomada de decisão quanto à adaptação das metodologias de inspeção aérea, com base nas considerações verificadas ao longo de todo este trabalho.

A lista de desvantagens equilibra as vantagens dos UAV, sendo que estas enquadram principalmente o cenário inteiro, onde os helicópteros apresentam uma eficiência e viabilidade superior cujo os UAV não conseguem competir. No entanto, segundo a proposta apresentada para cada design, os UAV enquadram um outro espectro de aplicações para além da inspeção total da rede.

4.4. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Embora em inspeções localizadas em diversos outros serviços os UAV compitam com as respetivas ferramentas e veículos tradicionais devido aos custos operacionais reduzidos, a aplicabilidade na REN é diferente pois são inspecionadas extensas faixas de linhas elétricas, nas quais os helicópteros são a ferramenta indicada pela sua autonomia aérea.

No entanto, os UAV podem representar soluções para outros cenários, como as inspeções de emergência e rotina pelas linhas e em subestações, com o design de asa rotativa, ou integrando a solução de asa fixa na gestão da vegetação e nidificação nas linhas, permitindo assim à REN tomar decisões mais confiantes com base na monitorização mais detalhada deste risco.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como principais objetivos identificar o estado da arte dos designs de UAV, os sistemas que os incorporam e a instrumentação que se adequa no âmbito das inspeções aéreas de linhas de transporte de energia ao encargo da REN.

Para o desenvolvimento deste trabalho foram consideradas as atuais metodologias das inspeções idealizando cenários onde os UAV se possam enquadrar. Para isso foram analisadas as principais entidades do mercado dos UAV e as demonstrações já existentes no âmbito do transporte de energia, na REN e em congêneres internacionais.

Confirmando que os UAV são ferramentas aptas a ambientes profissionais, neste trabalho desenvolveram-se estimativas que visam avaliar o desempenho dos UAV face aos orçamentos dos serviços propostos à REN no âmbito das inspeções. Com base nisto, as principais conclusões e propostas futuras que complementam este trabalho são apresentadas neste capítulo.

5.1. CONCLUSÃO

Os UAV enquadram as metodologias de inspeção na medida em que permitem realizar o levantamento aéreo tal como os helicópteros, o veículo que monitoriza a totalidade da rede. Deste modo, os helicópteros percorrem toda a extensão da rede oferecendo um leque de

produtos que permitem avaliar o estado dos ativos e identificar os troços mais críticos que requerem manutenção.

No entanto, para que os UAV apresentem o mesmo leque de levantamento aéreo, são necessários dois designs que se distinguem pelo modo como voam. A solução de asa fixa pela sua estabilidade de voo proveniente do funcionamento independente de cada motor, é indicada para inspeções detalhadas e localizadas, devido à baixa autonomia associada a este design. Por outro lado, o estilo de voo dos UAV de asa fixa é semelhante a outras aeronaves como os aviões e por isso são capazes de percorrer maiores distâncias, embora com autonomia limitada.

As operações com UAV são ainda bastante regulamentadas por serem aplicações ainda recentes, porém, os sistemas de navegação destes veículos estão cada vez mais otimizados, o que significa que os riscos associados são cada vez menores e a regulamentação poderá adaptar-se em função disto. Estes sistemas incluem uma grande precisão posicional e mecanismos de anti colisão, entre outras medidas que potenciam a segurança das operações.

Tal como se observa o avanço tecnológico na segurança das operações, o desempenho destas aeronaves também continuam a evoluir junto das principais entidades do mercado profissional dos UAV, cujas soluções acompanham as necessidades das diversas utilidades onde se encaixam. Por exemplo, identifica-se que o mais recente modelo de asa rotativa ultrapassa as características de autonomia e alcance dos restantes modelos até à data.

Por outro lado, no âmbito da aplicabilidade dos UAV na RNT, realizou-se toda uma análise onde se idealiza o desempenho dos UAV no ambiente da rede elétrica face ao atual orçamento das inspeções e conclui-se que os UAV nunca enquadrarão a inspeção total da rede, isto é, a substituição integral dos helicópteros, mas poderão otimizar outros aspetos das metodologias aéreas.

Isto não se verifica principalmente devido aos custos de deslocação terrestre associado às operações com UAV e devido à periodicidade de asa rotativa, onde seriam necessárias cerca de nove equipas equipadas com esta solução para inspecionar a totalidade da rede dentro da periodicidade de um ano.

Assim, esta solução apresenta-se viável em cenários mais curtos, como inspeções de emergência onde a deslocação terrestre é menor e a periodicidade deixa de ser considerável. Esta solução poderá representar uma rentabilidade de 21% no final de dois contratos com serviços de emergência de helicópteros, sendo que uma equipa com a melhor instrumentação enquadra outras funções como inspeções a subestações que não integra o orçamento dos helicópteros e assim este valor não está mensurado.

Com as operações automáticas e com baixos custos operacionais associados aos UAV, a solução de asa fixa enquadra-se na monitorização da vegetação numa altura em que a REN pretende otimizar a gestão deste risco. Da análise conclui-se que esta ferramenta permite mapear a totalidade da rede com custos muito inferiores quando comparados ao serviço dos helicópteros. Com isto, a monitorização do crescimento da vegetação poderia ser agora mais detalhada e 147% mais rentável do que adquirir serviços aéreos adicionais para este efeito, pois esta solução corresponde a apenas 30% do orçamento de inspeção da rede.

O desempenho da aquisição e das operações é otimizado quando acompanhadas de um conhecimento interno da rede e de uma gestão detalhada das operações, como na definição de pontos estratégicos ao longo de toda a rede. A flexibilidade dos UAV em conjunto com os baixos custos operacionais facilmente enquadram outros cenários não considerados, como as inspeções em subestações ou em situações que nem os helicópteros nem a inspeção apeada seriam capazes de resolver.

5.2. TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho responde aos objetivos propostos inicialmente na medida em que se concluiu que o estado do mercado dos UAV se enquadra em ambientes profissionais e poderão representar valor financeiro e operacional nas atuais metodologias das inspeções da REN segundo as propostas apresentadas para cada solução.

Este trabalho permite à REN tomar decisões acerca desta ferramenta com base na análise representada e perante os valores das atuais metodologias. Sendo a solução de asa fixa na gestão de risco da vegetação a proposta mais viável, poderão ser analisados outros modelos de UAV com autonomias superiores às aqui apresentadas (UAV a combustível), que terão melhor desempenho nesse cenário, mas cujos custos operacionais serão superiores.

No entanto, as características das operações com recurso a UAV deverão ser baseadas em mais demonstrações e demonstrações mais abrangentes para uma análise mais precisa e credível. Essa nova análise permitiria perceber os motivos dos orçamentos tão elevados das prestadoras de serviço dos UAV e verificar os valores propostos para cada solução. Considerando que o mercado evolui para poder substituir integralmente a conservadora metodologia dos helicópteros, deverá também ser realizada uma análise financeira desse projeto.

No futuro, caso esta oportunidade se verifique, as operações deverão ser acompanhadas de toda uma gestão detalhada e otimizada para os UAV.

O interesse nestas ferramentas sugere uma cooperação mais ativa com as entidades reguladoras de aviação e as distribuidoras dos UAV, que apresentam conceitos e objetivos bem definidos, soluções certificadas e estão sempre dispostos a demonstrações e parcerias de modo a expandir este mercado.

Referências Bibliográficas

- [1] Gartner, “Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2019,” *Gartner Inc.*, 2019. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-appear-on-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2019/>.
- [2] Gartner, “Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2017,” *Gartner Inc.* <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-in-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2017/>.
- [3] L. Goasduff, “Flying Drones Could Disrupt Mobility and Transportation Beyond COVID-19,” *Gartner Inc.*, 2020. Laurence Goasduff.
- [4] REN - Rede Eléctrica Nacional, “Caracterização da RNT para efeitos de acesso à rede (31 de dezembro de 2019),” 2019.
- [5] J. da C. Moreira, “Aplicação do método RCM às linhas de muito alta tensão da REN,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005.
- [6] REN - Rede Eléctrica Nacional, “Especificação Técnica - Estruturas Metálicas para Linhas e Subestações,” 2007.
- [7] L. M. F. Gonçalves, “Desenvolvimento de Índices de Estado de Linhas Aéreas de Muito Alta Tensão,” Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2018.
- [8] M. da I. e Energia, *Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão*. 1992.
- [9] REN - Rede Eléctrica Nacional, “Especificação Técnica - Cabos Nus para Linhas Eléctricas de M.A.T.,” 2007.
- [10] REN - Rede Eléctrica Nacional, “Especificação Técnica - Generic specification for optical ground wires to be applied in high voltage overhead lines,” 2007.

- [11] REN - Rede Eléctrica Nacional, “Especificação Técnica - Isoladores de cadeia para Linhas Eléctricas de M.A.T.,” 2007.
- [12] REN - Rede Eléctrica Nacional, “Especificação Técnica - Conjuntos Sinaléticos dos Apoios,” 2007.
- [13] REN - Rede Eléctrica Nacional, “Especificação Técnica - Dispositivo de balizagem aérea de linhas eléctricas de M.A.T.,” 2007.
- [14] A. M. da S. Pimenta, “Subestações de Energia Elétrica MAT Engenharia,” Instituto Politécnico de Tomar.
- [15] REN - Rede Eléctrica Nacional, “Política e Estratégias de Manutenção,” 2016.
- [16] REN - Rede Eléctrica Nacional, “Especificação Técnica - Estruturas Blindadas (GIS),” 2015.
- [17] REN - Rede Eléctrica Nacional, “Especificação Técnica - Disjuntores.”
- [18] REN - Rede Eléctrica Nacional, “Especificação Técnica - Transformadores de Potência,” 2019.
- [19] REN - Rede Eléctrica Nacional, “Especificação Técnica - Autotransformadores de Potência,” 2016.
- [20] REN - Rede Eléctrica Nacional, “A gestão de vegetação nas faixas de servidão das redes de transporte de eletricidade e a defesa da floresta contra incêndios,” 2016.
- [21] REN - Rede Eléctrica Nacional, “Especificação Técnica para Inspeção de Linhas Aéreas,” 2020.
- [22] ANAC, “Voanaboa,” 2018. <https://www.voanaboa.pt/perguntas-frequentes>.
- [23] ANAC, “Regulamento n.º 1093/2016, de 14 de dezembro,” *Diário da República*, vol. 2ª série, no. 238, pp. 20–23, 2016.
- [24] ANAC, “Guia de Utilização do Espaço Aéreo.”
- [25] AAN, “Regulamentação Levantamento Aéreo.” <https://aan.pt/subPagina-AAN-001.005.005-aeronaves-nao-tripuladas-drones>.

- [26] C. Europeia, *Regulamento de Execução (UE) 2019/947 da Comissão de 24 de maio de 2019*, vol. 2019, no. 6. 2019.
- [27] EASA, “Drones - Regulatory Framework Background.” <https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones-rpas/drones-regulatory-framework-background>.
- [28] C. Europeia, “Regulamento Delegado (UE) 2019/945, de 12 de março de 2019, relativo às aeronaves não tripuladas e aos operadores de países terceiros de sistemas de aeronaves não tripuladas,” no. 5, 2019, [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1561280688164&uri=CELEX:32019R0945>.
- [29] Measure, “The Case for Drones in Energy,” *Measure*. <https://www.measure.com/the-case-for-drones-in-energy>.
- [30] Y. Zefri, A. ElKettani, I. Sebari, and S. A. Lamallam, “Thermal Infrared and Visual Inspection of Photovoltaic Installations by UAV Photogrammetry—Application Case: Morocco,” *Drones*, vol. 2, no. 4, p. 41, 2018, doi: 10.3390/drones2040041.
- [31] GTA: Grupo Transitar & Associados, “Asa Fixa e Multirotor,” 2019. <https://www.gtalevantamentos.com.br/asa-fixa-ou-multirotor-principais-diferencas/>.
- [32] Delair, *Delair UX11 landing accuracy*. 2019.
- [33] S. P. Group, “Sensefly eBee X.” <https://www.sensefly.com/drone/ebex-fixed-wing-drone/>.
- [34] Delair, “Delair UX11,” *Delair*. <https://delair.aero/delair-commercial-drones/professional-mapping-drone-delair-ux11/>.
- [35] Delair, “DT26 Open Payload,” 2019. <https://delair.aero/delair-commercial-drones/dt26-open-payload/>.
- [36] DJI, “DJI Matrice 300 RTK,” 2020. <https://www.dji.com/pt/matrice-300>.
- [37] V. Drones, “Top Professional Drones for Commercial UAV Pilots,” 2020. <https://viper-drones.shop/top-professional-drones-for-commercial-uav-pilots/>.

- [38] DJI, “DJI Matrice 200 Series,” *DJI*. <https://www.dji.com/pt/matrice-200-series-v2/info#specs>.
- [39] U. S. Government, “GPS Accuracy,” 2020. <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/>.
- [40] M. Omerbashich, “Integrated INS/GPS Navigation,” *J. Air Transp.*, vol. 7, no. 1, 2002.
- [41] Oxts, “INS for UAV applications,” *Oxts*, 2016. <https://www.oxts.com/technical-notes/why-is-an-ins-important-for-mapping/>.
- [42] J. Wang, M. Garratt, A. Lambert, J. Wang, S. Han, and D. Sinclair, “Integration of GPS/INS/vision sensors to navigate unmanned aerial vehicles,” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 37, pp. 963–970, 2008.
- [43] GSA (Global Navigation Satellite Systems Agency), *EGNSS for Drones Operations*. 2020.
- [44] Wingtra, “PPK Drones & RTK Drones,” 2020. <https://wingtra.com/ppk-drones-vs-rtk-drones/>.
- [45] B. Rabkin, “GCP, PPK & RTK,” *Identified Technologies*, 2019. <https://www.identifiedtech.com/blog/drone-technology/gcps-ppk-rtk-best-receive-fast-accurate-data/>.
- [46] J. Mulakala, “Measurement Accuracy of the DJI Phantom 4 RTK & Photogrammetry,” p. 18, 2019, [Online]. Available: https://dronedeploy-www.cdn.prismic.io/dronedeploy-www%2Fb9c899fc-e093-4c3b-ae31-8dcbbd4a08ac_dji_phantom_4_rtk_book_f4.pdf%0Ahttps://dronedeploy-www.cdn.prismic.io/dronedeploy-www%2F93423f49-b020-4b5a-8546-7ed3ccbde6cd_dji_phantom_4_rtk_book_f-2.pdf.
- [47] E. Salahat, C. A. Asselineau, J. Coventry, and R. Mahony, “Waypoint Planning for Autonomous Aerial Inspection of Large-Scale Solar Farms,” *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, vol. 2019-Octob, pp. 763–769, 2019, doi: 10.1109/IECON.2019.8927123.

- [48] R. Tomislav, V. Andrija, I. Jurica, and W. Bo, "Challenges and Solutions for Urban UAV Operations," *Int. Sci. Conf. "Science Traffic Dev. 2018"*, no. July, pp. 1–11, 2018.
- [49] R. Division, "Communication aspects of Unmanned Aircraft System (UAS)," 2015.
- [50] F. Dimc and T. Magister, "Mini UAV communication link systems," *Promet Glob. Zb. Ref. Conf. Proc.*, no. May, p. 9, 2006.
- [51] J. Reid, "Drone Flying: Flight Modes," *Rotor Drone Pro.* <https://www.rotordronepro.com/flight-modes-101-2/>.
- [52] E. Torun, "UAV Requirements and Design Considerations," *RTO SCI Symp. "Warefare Autom. Proced. Tech. Unamanned Veh.*, pp. B4-1-B4-9, 1999, doi: 10.14339/RTO-MP-044.
- [53] G. B. and B. C. Bas Vergouw, Huub Nagel, "Drone Technology: Types, Payloads, Applications, Frequency Spectrum Issus and Future Developments," in *The Future of Drone Use*, 2016.
- [54] M. Gašparović and L. Jurjević, "Gimbal influence on the stability of exterior orientation parameters of UAV acquired images," *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 2, pp. 7–9, 2017, doi: 10.3390/s17020401.
- [55] A. R. Nasrullah, "Systematic Analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Derived Product Quality," no. February, p. 95, 2016.
- [56] DJI, "DJI Zenmuse X7." <https://www.dji.com/pt/zenmuse-x7>.
- [57] DJI, "DJI Zenmuse Z30." <https://www.dji.com/pt/zenmuse-z30>.
- [58] L. Wasser, "LiDAR Basics," *Neon Science.* <https://www.neonscience.org/lidar-basics>.
- [59] RIEGL, "RIEGL VUX-240." <http://www.riegl.com/products/unmanned-scanning/riegl-vux-240/>.
- [60] RIEGL, "RIEGL miniVUX-1UAV." [Online]. Available:

<http://www.riegl.com/products/unmanned-scanning/riegl-minivux-1uav/>.

- [61] G. International, “Power Line Inspection Using Airborne LiDAR.” <https://greenvalleyintl.com/applications/power-line-inspection-using-airborne-lidar/>.
- [62] DJI, “DJI Zenmuse XT.” <https://www.dji.com/pt/zenmuse-xt?>
- [63] FLIR, “FLIR Zenmuse XT2.” <https://www.flir.com/products/zenmuse-xt2/>.
- [64] DJI, “DJI Zenmuse H20.” <https://www.dji.com/pt/zenmuse-h20-series>.
- [65] Sonel, “Corona discharge detection - Sonel UV-260.”
- [66] J. Brady, “Infrared & UV Inspection of Overhead Transmission Lines: Experience in Florida, USA,” *INMR*, 2020. <https://www.inmr.com/infrared-inspection-overhead-transmission-lines-experience-florida-usa/>.
- [67] J. S. Visockiene, “Comparison of UAV images processing softwares,” *J. Meas. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 111–121, 2014.
- [68] J. I. Escobar Villanueva, Jairo R; Iglesias Martínez, Luis; Pérez Montiel, “DEM Generation from Fixed-Wing UAV Imaging and Flood Estimations,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 3205, 2019.
- [69] S. Hawkins, “Using a drone and photogrammetry software to create orthomosaic images and 3D models of aircraft accident sites,” *Isasi*, no. October, pp. 1–26, 2016.
- [70] I. Aicardi, F. Chiabrando, N. Grasso, A. M. Lingua, F. Noardo, and A. Spanó, “UAV Photogrammetry With Oblique Images: First Analysis on Data Acquisition and Processing,” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, vol. 2016-Janua, no. July, pp. 835–842, 2016, doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B1-835-2016.
- [71] T. Mendes, S. Henriques, J. Catalão, and P. Redweik, “Photogrammetry with UAV ’s : Quality Assessment of Open -Source Software for Generation of Ortophotos and Digital Surface Models,” *n VIII Conf. Nac. Cartogr. e Geod.*, pp. 1–8, 2015.
- [72] D. Carneiro, D. A. Silva, G. Willem, A. Toonstra, H. Lacet, and S. Souza, “Qualidade de Ortomosaicos de Imagens de VANT Processados com os Softwares

- APS , Pix4D e Photoscan,” *V Simpósio Bras. Ciências Geodésicas e Tecnol. da Geoinformação*, no. April, pp. 747–754, 2014.
- [73] ASPRS, “Accuracy Standards for Digital Geospatial Data,” no. March, 2015, [Online]. Available: http://www.asprs.org/a/society/divisions/pad/Accuracy/Draft_ASPRS_Accuracy_Standards_for_Digital_Geospatial_Data_PE&RS.pdf.
- [74] A. Barbasiewicz, T. Widerski, and K. Daliga, “The analysis of the accuracy of spatial models using photogrammetric software: Agisoft Photoscan and Pix4D,” *E3S Web Conf.*, vol. 26, 2018, doi: 10.1051/e3sconf/20182600012.
- [75] Pix4D, “Machine Learning meets Photogrammetry,” *Pix4D*. <https://www.pix4d.com/blog/machine-learning-meets-photogrammetry>.
- [76] G. International, “LiPowerline : Point Cloud Processing Software for Power Line Inspection and Analysis,” pp. 1–4.
- [77] Delair, “Delair Technical Proposal (UAV Demo),” 2020.
- [78] Delair, “Delair.AI - Visual Intelligence platform for enterprise asset management.” <https://delair.aero/delair-ai-visual-intelligence-for-enterprise-asset-management/>.
- [79] M. Cordonnier and P. Guzzini, “A Disruptive Method for Vegetation Management on ENEDIS’ Medium Voltagem Overhead Lines,” no. June, pp. 3–6, 2019.
- [80] S. Dorafshan and M. Maguire, “Bridge inspection: human performance, unmanned aerial systems and automation,” *J. Civ. Struct. Heal. Monit.*, vol. 8, no. 3, pp. 443–476, 2018, doi: 10.1007/s13349-018-0285-4.
- [81] “Cost Comparison : Drone vs . Traditional Surveying,” *Discount PHD*. .
- [82] *DJI M210 Water Test Hurricane Harvey*. .
- [83] H. Hansen, “Going Beyond visual line of sight (BVLOS),” *Rotor Drone Pro*, 2019. .
- [84] M. Choudhary, “What is BVLOS and why is it important for drone industry?,” *Geospatial World*, 2019. <https://www.geospatialworld.net/blogs/what-is-bvlos-and-why-is-it-important-for-drone-industry/>.

- [85] Civil Aviation Authority, “Beyond Visual Line of Sight in Non-Segregated Airspace: Fundamental Principles & Terminology,” 2019.
- [86] A. Iliaifar, “How We Achieved BVLOS Drone Authorisations Around the Globe,” *Waypoint Sensefly*, 2019. <https://waypoint.sensefly.com/sensefly-bvlos-drone-authorisations/>.
- [87] S. Fang, S. O’Young, and L. Rolland, “Development of Small UAS Beyond-Visual-Line-of-Sight (BVLOS) Flight Operations: System Requirements and Procedures,” *Drones*, vol. 2, no. 2, p. 13, 2018, doi: 10.3390/drones2020013.
- [88] J. A. Besada, A. M. Bernardos, L. Bergesio, D. Vaquero, I. Campana, and J. R. Casar, “Drones-as-a-service: A management architecture to provide mission planning, resource brokerage and operation support for fleets of drones,” *2019 IEEE Int. Conf. Pervasive Comput. Commun. Work. PerCom Work. 2019*, pp. 931–936, 2019, doi: 10.1109/PERCOMW.2019.8730838.
- [89] DJI, “Software de Gestão de Frotas DJI,” *DJI*, 2019. <https://www.dji.com/br/newsroom/news/dji-aprimorou-seus-drones-enterprise-e-software-de-gestao-de-frotas>.
- [90] Delair, “Delair powers ENEDIS’s quest for optimised grid inspection operations,” *Delair*, 2018. <https://delair.aero/power-utilities/delair-powers-enediss-quest-for-optimised-grid-inspection-operations/>.
- [91] Delair, “RTE relies on Delair DT26X LiDAR drone for power line inspection,” *Delair*, 2019. <https://delair.aero/power-utilities/rte-relies-on-delair-dt26x-lidar-drone-for-power-line-inspection/>.
- [92] Delair, “LiDAR acquisition by UAV & Power Lines inspection,” *Delair*, 2018. <https://delair.aero/power-utilities/lidar-acquisition-by-uav-power-lines-inspections-in-iceland/>.
- [93] B. Lillian, “Airbus Aerial Tries Out Drone, Satellite Combo for Utility Inspections,” *Unmanned Aerial Online*. <https://unmanned-aerial.com/airbus-aerial-tries-drone-satellite-combo-utility-inspections>.

- [94] Malcolm Malveiro; José Cordeiro, “Overhead power line stringing with UAV,” 2017.
- [95] P. Chung, “These drones string power lines along poles high above the ground,” *CNBC*, 2018, [Online]. Available: <https://www.cnbc.com/2018/06/18/drones-make-stringing-power-lines-safer.html>.
- [96] S. Lobermeier *et al.*, “Mitigating avian collision with power lines: a proof of concept for installation of line markers via unmanned aerial vehicle,” *J. Unmanned Veh. Syst.*, vol. 3, no. 4, pp. 252–258, 2015, doi: 10.1139/juvs-2015-0009.
- [97] D. Sabin, “Drone use fire to burn trash off power lines,” *Inverse*, 2017. <https://www.inverse.com/article/28032-drone-flamethrower-trash-video>.
- [98] M. Murison, “Aerones creates drone to de-ice and service wind turbines,” *Internet of Business*, 2018. <https://internetofbusiness.com/aerones-drone-de-ice-wind-turbines/>.
- [99] REN, “Mapa de Preços Unitários: Inspeções Aéreas com Helicóptero.” .
- [100] REN - Rede Eléctrica Nacional, “Inspeções Terrestre a Linhas - Acordo Quadro Manutenção de Linhas.” .
- [101] W. McLean, “Drones are cheap, soldiers are not: a cost-benefit analysis of war,” *The Conversation*, 2014. <https://theconversation.com/drones-are-cheap-soldiers-are-not-a-cost-benefit-analysis-of-war-27924>.
- [102] A. Chapman, “Drones: Total Cost of Ownership,” *AUAV*, 2017. <https://www.auav.com.au/articles/drones-total-cost-ownership-tco/>.
- [103] A. Ferguson, “PrecisionHawk: Beyond Visual Line of Sight Drone Flight.” [Online]. Available: <https://www.precisionhawk.com/beyond-visual-line-of-sight-bylos-drone-operations>.

