

Estado da arte dos sistemas de deteção automática de alterações da condição da superfície das aeronaves

Versão Final Após Defesa

Marco Leonardo Abreu Nóbrega

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Aeronáutica
(mestrado integrado)

Orientador: Prof. Doutor José Manuel Mota Lourenço da Saúde

abril de 2024

Declaração de Integridade

Eu, Marco Leonardo Abreu Nóbrega, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição a41906 de Mestrado Integrado em Engenharia Aeronáutica da Faculdade de Engenharias, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 03 /04 /2024

Dedicatória

Quero dedicar este trabalho ao meu avô, que apesar de já não estar entre nós moldou o meu percurso não só académico, mas também pessoal, sendo um farol de sabedoria e inspiração. Este trabalho é uma homenagem à sua memória e ao impacto que teve na minha vida.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, queria agradecer aos meus pais e à minha família pelo apoio que me deram ao longo de todos estes anos, não só durante o meu percurso na universidade, mas em todas as fases da minha vida pois estiveram sempre lá para mim de forma incondicional.

Quero agradecer ao senhor Professor Doutor José Manuel Mota Lourenço da Saúde, pela paciência, pelo apoio, pela prontidão e pela orientação que ofereceu ao longo desta fase do meu percurso académico.

Agradeço também à Aeromec pela disponibilidade e pelas oportunidades que me forneceram ao longo da realização desta dissertação, em especial aos engenheiros José Salvada, Eduardo Nunes e a Joelba Gonçalves.

Quero também agradecer à minha namorada Inês, ao Paulo, à Carla e ao senhor Isidro pelo suporte emocional que me deram, pelas grandes alegrias que me trouxeram e pela quantidade de vezes que conseguiram por um sorriso na minha cara nos momentos difíceis.

Por fim, quero agradecer ao Felipe, ao Samuel, ao Miguel e ao Bruno, por sempre conseguirmos ficar juntos mesmo nas fases difíceis do curso.

Resumo

A busca por eficiência na manutenção aeronáutica tem como objetivo melhorar a segurança, reduzir custos operacionais e minimizar o tempo de inatividade das aeronaves. A indústria aeronáutica procura constantemente elevados padrões de segurança e operacionalidade de uma forma rentável e flexível, integrando tecnologias avançadas e métodos inovadores. O uso de drones para inspeção proporciona acesso a áreas de difícil acesso, proporcionando imagens de alta resolução em tempo real, o que reduz significativamente o tempo de inspeção, aumenta a eficiência e contribui para a detecção precoce de danos, garantindo a segurança contínua das aeronaves e dos profissionais envolvidos.

Através da revisão do estado da arte da digitalização de imagem com o foco na detecção de alterações nas estruturas da aeronave C-130H, analisando minuciosamente as vantagens, desvantagens e limitações de cada etapa do processo, o que permitiu uma compreensão aprofundada das técnicas existentes, fornecendo informações cruciais para o desenvolvimento e aprimoramento da metodologia de detecção de alterações com recurso à digitalização de imagem.

A detecção de alterações na superfície da aeronave desempenha um papel vital na manutenção da aeronave, identificando potenciais problemas estruturais, desgaste ou danos que afetam a segurança e o desempenho. Essas alterações podem variar em cor, forma, geometria, tamanho e textura, indicando corrosão, erosão ou danos estruturais. O processamento de imagens para essa detecção envolve etapas como o pré-processamento para melhorar a qualidade das imagens e a seleção de itens de análise, como pixels individuais ou áreas de interesse.

A escolha de técnicas de detecção de alterações, como a comparação de imagens ou a utilização de mapas de diferenças, é crucial para identificar alterações entre as imagens de referência e as captadas durante a inspeção. Essas etapas combinadas formam um processo estruturado que possibilita a detecção eficiente de alterações na superfície da aeronave, facilitando uma manutenção preventiva mais precisa. A combinação de técnicas como centralização, segmentação e redimensionamento durante o pré-processamento de imagem oferece vantagens cruciais, suavizando e reduzindo a distorção e o ruído para uma análise mais detalhada.

Foi possível concluir que relativamente às técnicas de detecção de alterações, a utilização de métodos como a diferença de pixels por subtração ou divisão, a sobreposição e diferença entre partes segmentadas se destacam pela sua capacidade de identificar alterações subtis e significativas entre imagens, destacando áreas críticas onde estas alterações possam ter ocorrido.

Palavras-chave

Alteração da superfície; Drone; Processamento de imagem.

Abstract

The search for efficiency in aeronautical maintenance aims to improve safety, reduce operating costs and minimize aircraft downtime. The aeronautical industry is constantly striving for high standards of safety and operability in a cost-effective and flexible manner by integrating advanced technologies and innovative methods. The use of drones for inspection provides access to hard-to-reach areas, providing high-resolution images in real time, which significantly reduces inspection time, increases efficiency and contributes to the early detection of damage, ensuring the continuous safety of aircraft and the professionals involved.

Through the review of the state of the art of image scanning with a focus on detecting changes in the structures of the C-130H aircraft, thoroughly analyzing the advantages, disadvantages and limitations of each step of the process, which allowed an in-depth understanding of the existing techniques, providing crucial information for the development and improvement of the methodology for detecting changes using image scanning.

Detecting changes to the aircraft surface plays a vital role in aircraft maintenance by identifying potential structural issues, wear or damage that affect safety and performance. These changes can vary in color, shape, geometry, size, and texture, indicating corrosion, erosion, or structural damage. Image processing for this detection involves steps such as pre-processing to improve the quality of the images and the selection of analysis items, such as individual pixels or areas of interest.

The choice of change detection techniques, such as comparing images or using difference maps, is crucial for identifying changes between the reference images and those captured during the inspection. These combined steps form a structured process that enables efficient detection of changes to the aircraft surface, facilitating more accurate preventive maintenance. The combination of techniques such as centering, segmentation, and resizing during image pre-processing offers crucial advantages, smoothing and reducing distortion and noise for more detailed analysis.

It was possible to conclude that regarding the alteration detection techniques, the use of methods such as the difference of pixels by subtraction or division, the overlap and the difference between segmented parts stand out for their ability to identify subtle and significant changes between images, highlighting critical areas where these changes may have occurred.

Keywords

Surface alteration; Drone; Image processing.

Índice

| | |
|---|----|
| Capítulo 1-Introdução | 1 |
| 1.1 Motivação..... | 1 |
| 1.2 Objetivos..... | 2 |
| 1.3 Âmbito da dissertação..... | 2 |
| 1.4 Limitações do trabalho..... | 2 |
| 1.5 Metodologia | 3 |
| 1.6 Estrutura..... | 3 |
| Capítulo 2 - Aeromec..... | 5 |
| 2.1 História..... | 5 |
| 2.1.1 OMNI aviation group..... | 5 |
| 2.2 Apresentação da Aeromec | 5 |
| 2.2.1 Operações..... | 6 |
| 2.2.2 Certificações e aprovações..... | 8 |
| Capítulo 3 - Estado de arte de manutenção de aeronaves e descrição do projeto de drone para inspeção..... | 9 |
| 3.1 Manutenção de aeronaves | 9 |
| 3.1.1 Manutenção de linha e de base | 11 |
| 3.1.2 Organizações Aprovadas de Manutenção | 11 |
| 3.1.3 Aeronavegabilidade | 13 |
| 3.2 Tipos de estruturas aeronáuticas | 14 |
| 3.3 Aeronave de referência (C-130)..... | 15 |
| 3.3.1 História do C-130..... | 15 |
| 3.3.2 C-130 na Força Aérea portuguesa..... | 16 |
| 3.3.3 Especificações técnicas do C-130H e do C-130H-30..... | 16 |
| 3.4 Apresentação do projeto..... | 18 |
| 3.5 Alterações em superfícies de aeronaves (“ <i>findings</i> ”) | 19 |
| 3.5.1 Caracterização das alterações da superfície..... | 20 |
| Capítulo 4 - Sistemas automáticos de deteção de alterações da superfície..... | 29 |
| 4.1 Pré-processamento de imagem..... | 30 |
| 4.2 Escolha da técnica de deteção de alterações | 31 |
| 4.2.1 Itens de análise..... | 31 |
| 4.2.2 Técnicas de deteção de alterações na superfície | 37 |
| 4.2.3 Avaliação do processamento de imagem..... | 43 |
| 4.2.4 Resultados Obtidos | 43 |
| Capítulo 5 – Conclusão..... | 46 |
| 5.1 Trabalhos futuros | 47 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1: Logotipo da OMNI Aviation Group..... | 5 |
| Figura 2: Logotipo da Aeromec..... | 6 |
| Figura 3: Manutenção no Falcon-50 operado pela Força Aérea Portuguesa (FAP)..... | 7 |
| Figura 4: C-295M da Força Aérea (FAP)..... | 7 |
| Figura 5 Vistas da aeronave Hercules C-130H..... | 18 |
| Figura 6:Exemplo de corrosão do C-130 localizada no estabilizador horizontal..... | 21 |
| Figura 7:Exemplo de corrosão por esfoliação do C-130 localizada no estabilizador horizontal... | 21 |
| Figura 8: Exemplo de corrosão por pites..... | 22 |
| Figura 9: Exemplo de corrosão em frestas em parafusos do C-130 localizada na parte central da asa..... | 23 |
| Figura 10:Exemplo de fissura no C-130 localizada no cockpit..... | 23 |
| Figura 11: Exemplo de uma deformação da casca do C-130 localizada no estabilizador vertical | 24 |
| Figura 12: Exemplo de falta de tinta no C-130 localizada no estabilizador vertical..... | 25 |
| Figura 13: Exemplo da falta de um rebite do C-130 localizada perto do bordo de fuga da asa ... | 26 |
| Figura 14: Exemplo de um risco do C-130 localizada na parte superior da fuselagem | 27 |
| Figura 15: Lógica utilizada para a deteção de alterações..... | 29 |
| Figura 16: Exemplo da utilização de vetores poligonais..... | 34 |
| Figura 17: Exemplos de uso para cada um dos itens de análise | 36 |
| Figura 18: Processo de deteção de alterações para técnicas baseadas em objetos..... | 40 |
| Figura 19: Fluxograma resumo das técnicas seleccionadas..... | 45 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Especificações técnicas Hercules C-130H..... | 17 |
| Tabela 2: Especificações técnicas Hercules C-130H-30..... | 17 |
| Tabela 3: Características físicas de cada alteração de uma superfície de uma aeronave..... | 28 |
| Tabela 4: Resumo das vantagens, desvantagens dos itens de análise e respectivos exemplos das alterações que cada uma consegue suportar..... | 35 |
| Tabela 5: Resumo das vantagens, desvantagens das metodologias de detecção de alterações e exemplos das alterações que cada uma consegue suportar..... | 43 |

Lista de siglas e de acrónimos

| | |
|------|--|
| AMO | <i>Approved Maintenance Organisation</i> |
| AMS | <i>Approved Maintenance Schedule</i> |
| ANAC | Agência Nacional de Aviação Civil |
| AOC | <i>Air Operator Certificate</i> |
| CE | Comissão Europeia |
| CNN | <i>Convolutional Neural Network</i> |
| DOCD | <i>Direct Object Change Detection</i> |
| EASA | <i>European Aviation Safety Agency</i> |
| EU | <i>European Union</i> |
| FA | Força Aérea |
| FAA | <i>Federal Aviation Administration</i> |
| GPS | <i>Global Positioning System</i> |
| ICAO | <i>International Civil Aviation Organization</i> |
| JAA | <i>Joint Aviation Authorities</i> |
| MEL | <i>Minimum Equipment List</i> |
| MPD | <i>Maintenance Planning Document</i> |
| OHI | <i>OMNI Helicopters International</i> |
| RPN | <i>Region Proposal Network</i> |
| SAWC | <i>Safe At Work California</i> |
| TC | <i>Type Certificate</i> |

Capítulo 1-Introdução

Este capítulo, inicia-se com uma introdução ao projeto, onde são destacados os objetivos e motivação deste trabalho dentro do contexto do projeto, assim como a metodologia utilizada.

1.1 Motivação

Desde os seus primórdios a indústria aeronáutica sempre procurou a forma mais eficiente de realizar as suas funções mantendo sempre os níveis de segurança adequados às suas atividades, sejam estas de fabricação, de manutenção ou de operação. Os estudos realizados nesta indústria visam, assim, melhorar a qualidade de vida e de trabalho de todos os envolvidos.

A utilização de drones na indústria aeronáutica, com enfoque na inspeção e manutenção de aeronaves é um dos possíveis meios de aumentar a eficiência destas operações. A utilização desta ferramenta com o foco de deteção de alterações na superfície é um campo de pesquisa e desenvolvimento impactante nesta indústria, pois oferece uma série de oportunidades e benefícios que podem revolucionar o formato com que são realizadas as inspeções de uma aeronave.

A precisão na deteção de anomalias é um dos fatores que tende a aumentar devido ao facto de os drones poderem ser equipados com câmaras de alta resolução, de sensores e um sistema GPS que irá permitir a identificação do local onde podem ter ocorrido pequenas ou grandes alterações, que podem até não ser visíveis a olho nu ou ser de difícil deteção numa inspeção manual.

A utilização desta ferramenta facilitará a inspeção das áreas da superfície de uma aeronave, permitindo acesso mais fácil a locais que seriam difíceis de alcançar manualmente e poderiam até mesmo colocar o inspetor em situações de risco de vida. Isso inclui superfícies elevadas, partes estruturais complexas ou áreas confinadas, como a parte superior da fuselagem, o extradorso das asas e a deriva.

Outro fator motivador por trás da maioria dos avanços tecnológicos, incluindo este projeto, é a redução de tempo e custos. Ao usar drones para inspeção, é possível diminuir significativamente o tempo necessário para essa atividade. Isso, por sua vez, reduz o ônus financeiro para as empresas envolvidas com aeronaves, já que não há necessidade de investir constantemente em equipamentos caros ou plataformas de acesso. Além disso, o tempo de inatividade da aeronave é reduzido, proporcionando mais tempo produtivo para as operadoras.

A manutenção preventiva, e por extensão o aumento da segurança, é outro ponto tentador, pois a deteção precoce de uma alteração bem como o seu registo cria a possibilidade de implementar estratégias de manutenção preventiva que ajudam a evitar falhas não previstas e assim melhora a segurança da operação de aeronaves.

Sendo assim, qualquer trabalho que se foque na utilização de drones para o processo de inspeção, contribui para os avanços tecnológicos e operacionais nas aéreas da segurança, eficiência e sustentabilidade.

Em complemento, é importante dar conta que este trabalho decorreu no contexto da empresa Aeromec, em particular, a respetiva participação no projeto da agenda mobilizadora Aero.Next Portugal no pacote de trabalho WP 3 – projeto ILAN-VR.

Este projeto, que se encontra em execução e, tem por propósito o desenvolvimento de uma solução que realize de forma automática a avaliação da superfície de aeronaves de grande porte, constitui o motivo para a realização desta dissertação.

Neste sentido, a base motivacional deste trabalho foi a possibilidade do resultado poder contribuir positivamente para o conhecimento associado ao processo conducente ao reconhecimento de alterações da superfície das fuselagens.

1.2 Objetivos

Apresentar estudo que contemple uma metodologia para identificação de alterações da superfície de fuselagens recorrendo a processos de digitalização, de modo a permitir levantar do estado da arte um processo automático de avaliação da aeronave C130.

1.3 Âmbito da dissertação

Este trabalho pretende apresentar uma série de definições e características associadas ao projeto ILAN-VR, sendo que nestas estão incluídas descrições de manutenção que serão essenciais para enquadrar o projeto nos atuais parâmetros da atividade de manutenção de aeronaves. Esta dissertação pretende também aludir a algumas das possíveis alterações que ocorrem em superfícies de uma aeronave identificando características físicas que serão úteis na escolha da metodologia da identificação da alteração.

Simultaneamente, apresentar conceitos essenciais de processos de digitalização e metodologias de deteção de alterações da condição da superfície, fazer a sua descrição bem como identificando as suas características no que diz respeito às suas limitações, às vantagens e às suas desvantagens de cada um destes possíveis meios de deteção, indicar também em que circunstâncias seriam úteis e em que situações não seriam viáveis no âmbito do referido projeto.

1.4 Limitações do trabalho

A primeira limitação deste trabalho prende-se com o facto de que do decorrer da sua realização não foi escolhida uma câmara, ou seja, não se sabe a precisão e a resolução das imagens que irão ser retiradas durante o processo de inspeção, podendo assim tornar alguns processos não viáveis para o processamento das imagens.

Outra limitação que este trabalho enfrentou foi a verificação da metodologia apresentada como sendo ideal para o âmbito deste projeto já que não foram retiradas novas imagens durante

o processo de inspeção, pela falta do drone em si o que impossibilitou a verificação de existência de alteração entre as imagens de referência e as retiradas durante o processo de inspeção.

1.5 Metodologia

Este trabalho teve como principal base a pesquisa bibliográfica e da internet nas áreas da manutenção de aeronaves, nas possíveis alterações que se encontram em superfícies de aeronaves, nas estruturas que sejam sujeitas a este tipo de inspeção e principalmente o processamento de imagens incluindo o pré-processamento, a escolha das opções de detecção de alterações de forma digital em imagens.

A fim de se obter uma metodologia capaz de identificar alterações nas superfícies das fuselagens será feita então, a partir das pesquisas realizadas, uma descrição de diversos e possíveis processos de processamento de imagem bem como de detecção de alterações dando ênfase às suas vantagens e desvantagens perante o âmbito deste projeto.

A verificação da funcionalidade do método que é apresentado como uns dos ideais na parte conclusiva deste trabalho não será realizado nesta dissertação, pois esta função cabe a outra empresa envolvida neste projeto.

Este trabalho pretende esclarecer que a sua abordagem não consiste numa investigação primária sobre o uso de drones, mas sim numa síntese e análise do estado atual das técnicas empregadas neste campo, de análise de imagem. Em detrimento da realização de experiências ou recolha de novos dados, a ênfase está na compilação e avaliação das práticas mais avançadas e eficazes estabelecidas. Ao reunir e examinar este conjunto diversificado de técnicas, o objetivo principal consiste em oferecer uma visão abrangente e atualizada do conjunto de métodos disponíveis na digitalização de imagem com visa a identificar alterações dentro destas.

1.6 Estrutura

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos

O primeiro capítulo é introdutório ao projeto, no qual esta dissertação se insere, bem como apresenta e realça os objetivos deste trabalho no âmbito do projeto, incluindo a metodologia usada ao longo da dissertação.

O segundo capítulo é uma apresentação da empresa Aeromec pela qual esta dissertação foi realizada em conjunto. Este capítulo inclui a descrição do grupo OMNI onde a Aeromec se insere bem como a história e as certificações desta empresa.

O terceiro capítulo apresenta conceitos de manutenção que sejam importantes para enquadrar o projeto nos atuais parâmetros da atividade de manutenção. De um modo geral, inclui também uma breve parte das estruturas da aeronave que se pretende estudar, bem como a aeronave de estudo que inclui a sua história e as especificações técnicas do modelo do estudo. Neste capítulo surge, também, a apresentação do projeto onde esta dissertação se insere, inclui também a identificação e caracterização dos possíveis e diferentes tipos de alterações que possam ocorrer nas superfícies aeronáuticas.

O capítulo quatro foca-se, portanto, em reunir possíveis metodologias de processamento de imagens. Inclui o seu pré-processamento, os itens de análise do processamento e as técnicas de detecção de alteração de imagens. Em todas estão incluídas as vantagens e desvantagens, como seriam úteis ou não em diversas situações de alteração das imagens (*findings*). Por fim tem-se a indicação de como será feita a avaliação dos resultados obtidos. Está indicada e justificada a melhor metodologia a adotar para o projeto tendo em consideração as vantagens e desvantagens.

No capítulo final é realizado um levantamento do que foi feito no trabalho, indicando o que se obteve no trabalho tendo em conta o objetivo do mesmo e como ele foi abordado. Este capítulo apresenta também possíveis futuros trabalhos no âmbito deste projeto.

Capítulo 2 - Aeromec

Neste capítulo, serão compartilhados detalhes sobre a empresa Aeromec que colaborou neste estudo, além da exploração da história e certificações desta empresa. Será, também, descrito o grupo OMNI, do qual a Aeromec faz parte.

2.1 História

2.1.1 OMNI aviation group

Desde 1988 a OMNI *aviation group* apresenta-se como uma referência no mundo da aviação (OMNI, 2023). Iniciou a sua atividade no âmbito dos helicópteros, tendo evoluído para aviões de asa fixa, no início de 1990, e posteriormente para a prestação de outros serviços no mundo da aviação, dos quais se destacam: a operação de voos charter de curto e longo alcance, voos VIP, prestação de serviços de manutenção, modificação de aeronaves, evacuação e resgate, escola de aviação na qual se incluiu o treino de refrescamento, pilotagem, treino em simulador bem como treino de operadores de *handling* e consultoria (OMNI, 2023; OATC, 2023; Fly White, 2023; Omni Executive Aviation, 2023).

De forma a acompanhar o grande crescimento da indústria de transporte em aeronaves de asa rotativa no Brasil, foi criado mais recentemente a OHI- OMNI *Helicopters International* (OHI, 2023).

Deste modo, o grupo conta com 5 *Air Operator Certificate* (AOCs), espalhados por Portugal, Brasil e Cabo Verde. Assim, a OMNI *Aviation Group* é um dos principais grupos de empresas de aviação da Europa operando em mais de 65 aeronaves tanto de asa rotativa como de asa fixa (CVE, 2023; OMNI, 2023; OATC, 2023; Omni Executive Aviation, 2023).

Atualmente, existem oito empresas associadas a este grupo (logotipo deste grupo pode ser observado na Figura 1), dentro destas encontra-se a Aeromec (OMNI, 2023).



Figura 1: Logotipo da OMNI Aviation Group

Fonte: (OMNI, 2023)

2.2 Apresentação da Aeromec

Integrada no OMNI *Aviation Group*, e tendo sido fundada em 1991, a Aeromec (logotipo na Figura 2) apresenta-se como sendo uma empresa de manutenção e reparação de aeronaves, certificada pela *European Aviation Safety Agency* (EASA) Part 145 (Aeromec, 2023a).

Segundo a Aeromec (2023a) esta empresa encontra-se presente não só em Portugal como também no Brasil, Cabo Verde, Moçambique, Camarões, São Tomé e Príncipe e na Guiné Equatorial.

A Aeromec fornece serviços, não só de manutenção e reparação de aeronaves de asa fixa e rotativa no setor comercial, executivo e militar, como também a melhoria nos sistemas de aviónicos, comercialização de sistemas para combate a fogos em aeronaves de asa fixa e rotativa, bem como apoio logístico, quando solicitado, no ramo da engenharia aeronáutica (Aeromec, 2023a).



Figura 2: Logotipo da Aeromec

Fonte: (Aeromec, 2023a)

2.2.1 Operações

A Aeromec tem sede em Oeiras, no entanto as operações de manutenção, reparação e inspeção de aeronaves decorrem no aeródromo de Cascais e no aeroporto do Porto.

Em termos das suas capacidades, a Aeromec realiza manutenção de base e de linha em diferentes aeronaves, sejam estas de asa fixa ou de asa rotativa e comerciais ou militares.

A nível comercial a Aeromec realiza operações nas seguintes aeronaves (Aeromec, 2023b).

- i) Airbus: A320, A319, A321 e A318;
- ii) Boeing: B737 NG e B777;
- iii) Beechcraft: Hawker200 e Hawker 1900D;
- iv) ATR: ATR-42 e ATR-72;
- v) Dassault Aviation: Falcon 50 e Falcon 900;
- vi) Bombardier: Learjet 40 e Learjet 45.

No âmbito da manutenção de aeronaves, a Aeromec apresenta-se com capacidade de manutenção de base e de linha, no entanto nas aeronaves da família da Airbus e da Boeing só é realizada a manutenção de linha (Aeromec, 2023b).

Relativamente às aeronaves militares, a Aeromec responde a todas as necessidades da Força Aérea portuguesa (FA), realizando qualquer tipo de operações necessárias no âmbito da manutenção e reparação em diversos modelos de aviões de vários fabricantes, tais como (Aeromec, 2023c):

- i) C-130/L-100 Hercules;
- ii) P-3 Orion;
- iii) C-212;

- iv) CN-235
- v) C-295; (ver Figura 4);
- vi) Falcon 50 (ver Figura 3).



Figura 3: Manutenção no Falcon-50 operado pela Força Aérea Portuguesa (FAP)

Fonte: (Aeromec, 2023)

No que concerne a aeronaves de asa rotativa, a Aeromec tem capacidades de operar ao nível da manutenção e reparação de diversos modelos, sendo estes (Aeromec, 2023d):

- i) Bell 206/212/222/412;
- ii) Sikorsky S76A;
- iii) Eurocopter AS350.



Figura 4: C-295M da Força Aérea (FAP)

Fonte: (Força Aérea, 2023b)

Esta empresa presta, ainda, outro tipo de serviços na aviação, apresentando soluções de interior da cabina que incluem, a redução do ruído dentro da cabine e uma melhoria na estabilidade térmica (Aeromec, 2023e).

Estas melhorias incluem os sistemas de comunicações, os gravadores, os ecrãs, sejam estes integrados ou não, bem como a adição de equipamentos para a melhoria da perceção situacional, oferecendo assim opções design e engenharia, num vasto leque de situações e opções (Aeromec, 2023f).

2.2.2 Certificações e aprovações

No ramo da aviação existem inúmeras certificações e aprovações que representam distintas funções e objetivos.

No que concerne à Aeromec, esta apresenta as certificações necessárias de forma a manter capacidade para executar ações de manutenção, das quais se destacam (Aeromec, 2023g):

- i) organização de manutenção de aeronaves aprovada pela EASA Part 145, com a referência PT.145.012;
- ii) organização de manutenção aprovada PMAR 145 com a referência AAN.PRT.145.04;
- iii) organização aprovada com certificado de manutenção de aeronaves emitida pela República de Moçambique, com o número do certificado MOZ-14/2013
- iv) aprovação certificada pela ANAC com o número de aprovação sendo 0068/AMO-ANAC/2021;
- v) aprovação ANAC RBAC 145 com a referência de aprovação 1010-32/ANAC (do Brasil).

Possui ainda no domínio aeronáutico as seguintes certificações:

- i) pelo Ministério de Defesa aeronaves em AQAP 2110, com a referência N°10/DGRDN;
- ii) EASA Part CAMO com o número de referência sendo PT.CAMO.051;

e ainda certificações de carácter geral (ou seja, sem ligação à aeronáutica):

- i) organização com Certificado de conformidade relativo ao sistema de gestão ambiental (14001:2015) com o registo PT18/06269;
- ii) empresa com certificado de conformidade relativa ao sistema de gestão de qualidade (9001:2015) com a referência PT08/02365.

Capítulo 3 - Estado de arte de manutenção de aeronaves e descrição do projeto de drone para inspeção

Neste capítulo, são abordados conceitos essenciais de manutenção, relevantes para contextualizar o projeto dentro dos padrões atuais da atividade de manutenção. Além disso, é discutido de forma breve as estruturas da aeronave que serão objeto de estudo, bem como a história e as especificações técnicas do modelo da aeronave em questão. Aqui, também será apresentado o projeto no qual esta dissertação está inserida, fornecendo uma identificação e caracterização dos diferentes tipos de alterações possíveis nas superfícies aeronáuticas.

3.1 Manutenção de aeronaves

Qualquer aeronave, em algum ponto da sua vida útil, terá de ser sujeita a algum tipo de operação de manutenção e reparação. Infelizmente, existem fatores que levam a que estas intervenções tenham de ser realizadas de forma mais célere devido ao uso da própria aeronave nomeadamente o ambiente em que opera (e.g. em gelo, num deserto, entre outras), do tempo de vida de cada peça, bem como ao número de ciclos.

Nos fatores, anteriormente mencionados, entram a fadiga, a corrosão e o desgaste, podendo haver exemplos que impliquem a substituição de peças, como é em situações em que existe uma falha estrutural catastrófica (quebra de um componente), por precaução ou porque as alterações nas peças não se enquadram dentro dos padrões limite estipulados (Universidad Europea, 2023).

De acordo com o Regulamento da União Europeia 1321/2014, artigo 2, define-se manutenção (aeronáutica) como sendo: “qualquer uma ou a combinação das seguintes atividades: revisão, reparação, inspeção, substituição, modificação ou retificação de defeitos de uma aeronave ou componente de aeronave, com exceção da inspeção pré-vo” (Comissão Europeia, 2014, p. 3).

Paralelamente e, sem prejuízo para a definição legal e oficial do que é a manutenção aeronáutica, segundo Cranfield University (2023a), diversos autores procuraram apresentar a referida atividade numa perspetiva industrial, destacando-se a da Avitas, de Hessburg, bem como a de Kinnison e Siddiqui, respetivamente:

- i) *“Those actions required for restoring or maintaining an item in serviceable condition including servicing, repair, modification, overhaul, inspection and determination of condition preservation and storage”* (Avitas, 2023);
- ii) *“Maintenance is the action necessary to sustain or restore the integrity and performance of the airplane”* (Kinnison & “Terry” Siddiqui, 2013, p. 35);
- iii) *“Maintenance is the process of ensuring that a system continually performs its intended function at its designed-in level of reliability and safety”* (Kinnison & “Terry” Siddiqui, 2013, p. 35).

De modo geral, a atividade de manutenção de aeronaves tem como principal objetivo manter a aeronave na sua condição de aeronavegabilidade (ou seja, assegurar o cumprimento das instruções de aeronavegabilidade continuada ou permanente) isto indica que a mesma tem que se encontrar num estado que seja seguro e que se encontre dentro dos regulamentos impostos pelas autoridades da aviação competentes (Baesystems, 2023).

As principais áreas de inspeção realizadas, ocorrem principalmente nos motores, nos sistemas hidráulicos, nos sistemas elétricos, nos aviônicos, na estrutura e trem de aterragem, dando ainda importância aos aspetos relacionados com a regularidade e a profundidade com que são feitas estas inspeções.

A manutenção de aeronaves pode ser dividida em dois grupos:

- i) programada (*scheduled*);
- ii) não-programada.

A manutenção programada segue um programa predefinido baseando-se no uso da aeronave, o que inclui o número de horas de voo e quantidade de ciclos a que cada peça é sujeita. Este programa denomina-se Programa de Manutenção da Aeronave.

Este tipo de manutenção inclui inspeções de rotina aos diversos componentes da aeronave, remoção de peças que atingiram o limite operacional tendo em conta os fatores anteriormente referidos ou até mesmo de forma preventiva. Assim, a manutenção programada permite uma minimização dos riscos de falha dos componentes e ao mesmo tempo um aumento na segurança nas operações da aeronave. Deste modo, este tipo de manutenção é planeado com antecedência e com um itinerário proposto pelo fabricante consoante o uso da aeronave (Universidad Europea, 2023).

O outro tipo de manutenção, não-programada, e como o nome indica não pressupõe data marcada, pois é realizada assim que necessária. Esta ocorre, na maior parte das vezes, aquando da identificação de problemas que surgem sem aviso prévio e que normalmente tem uma natureza urgente, sendo por tal necessário um procedimento de manutenção imediato, de forma que a aeronave mantenha a sua condição de aeronavegabilidade segura e dentro dos regulamentos (Universidad Europea, 2023).

A manutenção de aeronaves é uma atividade que exige regras claras para serem cumpridas (em todos os aspetos, e.g., pessoal, logística), tendo por tal de ser altamente regulada e estruturada, daí este processo ser regulamentado por autoridades aeronáuticas nacionais e internacionais.

Nos Estados Unidos da América a autoridade a quem compete esta regulamentação é a *Federal Aviation Administration* (FAA) e na Europa esta função compete à *European Aviation Safety Agency* (EASA). Deste modo, os standards e regulamentos que determinam a manutenção de uma aeronave são impostos por estas entidades anteriormente mencionadas que determinam que as operações de manutenção sejam efetuadas por agências e indivíduos qualificados.

3.1.1 Manutenção de linha e de base

Na manutenção programada existem dois tipos principais de manutenção que podem ser realizadas à aeronave, a manutenção de linha e a manutenção de base.

A manutenção de linha inclui qualquer tipo de manutenção que seja necessária realizar antes do voo, de forma que a aeronave esteja capaz de realizar o voo pretendido de forma segura, “*any maintenance that is carried out before flight to ensure that the aircraft is fit for the intended flight*” (EASA Part-145 AMC145.A.10, 2016, p. 161), podendo abranger as seguintes atividades conforme descrito na referida regulamentação da EASA:

- i) “A resolução de problemas;
- ii) A retificação de defeitos;
- iii) Substituição de componentes com recurso a equipamento de ensaio externo, se necessário. A substituição de componentes pode incluir componentes como motores e hélices.
- iv) Manutenção e/ou verificações programadas, incluindo inspeções visuais que detetem condições insatisfatórias óbvias/discrepâncias, mas que não exijam uma inspeção aprofundada. Pode também incluir a estrutura interna, os sistemas e os elementos do grupo motopropulsor que são visíveis através de painéis/portas de acesso de abertura rápida.
- v) Pequenas reparações e modificações que não exijam uma desmontagem extensiva e possam ser efetuadas por meios simples.”

Por sua vez, a manutenção de base é uma atividade efetuada nas aeronaves que permite realizar tarefas mais aprofundadas e com um maior detalhe quando comparada com a manutenção de linha.

Assim, a manutenção de base inclui em regra inspeções específicas denominadas de C e D (o que inclui reparação e substituição de peças defeituosas, bem como instalação de atualizações de grande escala) que envolvem a desmontagem de inúmeras peças ou de complexidade elevada, renovação da pintura e até mesmo a reconfiguração da cabine (Cranfield University, 2023a). Por tal motivo, este tipo de manutenção é mais demorado, no entanto ocorre com menor frequência que a manutenção de linha.

A frequência com que ocorre qualquer um destes tipos de manutenção tem por base o que se encontra definido no Plano de Manutenção da Aeronave o qual foi aprovado pela autoridade aeronáutica nacional, de acordo com o que se encontra definido no *Approved Maintenance Schedule* (AMS), e ainda no *Maintenance Planning Document* (MPD) (ambos os documentos da responsabilidade da entidade detentora do certificado de tipo) (Cranfield University, 2023a).

3.1.2 Organizações Aprovadas de Manutenção

A *Aircraft Maintenance Organizations* (AMO) no ramo da aeronáutica é uma organização autorizada que efetua a manutenção e reparação de aeronaves segundo o

regulamento da União Europeia 1321/14 de 2014 na sua parte correspondente denominada de Parte 145.

Estas entidades desempenham papéis fundamentais para manter e garantir que as aeronaves se encontrem dentro dos regulamentos de segurança e dos critérios de manutenção estabelecidos pelas autoridades de aviação civil como os casos da EASA e da FAA.

As empresas AMO encontram-se licenciadas e certificadas pelas autoridades competentes, anteriormente referidas, de forma a poderem desempenhar uma variedade de tarefas desde a manutenção da aeronave, as inspeções de rotina e reparações necessárias aos componentes das mesmas (Skybrary, 2023a).

Sendo assim, as entidades que atuam como AMO seguem os padrões rigorosos de qualidade e segurança estabelecidos pelas autoridades de aviação civil, com o intuito de manterem as suas certificações.

Para tal é necessária uma formação adequada de pessoal, o uso de ferramentas e equipamentos de forma correta, a documentação correspondente às ações de manutenção realizadas, bem como a conformidade com os procedimentos de segurança exigidos num ambiente de trabalho (Skybrary, 2023a).

Os critérios para a certificação das entidades de manutenção encontram-se identificadas no Regulamento 1321 ínsito no Jornal Oficial da União Europeia (EU) de 2014, sendo estas especificações as seguintes:

- i) “as entidades envolvidas na manutenção de aeronaves de grande porte ou de aeronaves utilizadas no transporte aéreo comercial, bem como dos componentes destinados a instalação nas mesmas, devem ser certificadas em conformidade com as disposições constantes do anexo II (parte 145)” (Comissão Europeia, 2014, p. 3);
- ii) “os certificados de manutenção emitidos ou reconhecidos por um Estado-Membro em conformidade com os requisitos e procedimentos das JAA e válidos em data anterior à da entrada em vigor do Regulamento (CE) n.º 2042/2003 são considerados como tendo sido emitidos em conformidade com o presente regulamento.” (Comissão Europeia, 2014, p. 3);
- iii) “o pessoal qualificado para realizar e/ou controlar os ensaios de aeronavegabilidade permanente e de não-destrutibilidade das estruturas e/ou dos componentes de aeronaves, em conformidade com qualquer norma reconhecida por um Estado-Membro em data anterior à da entrada em vigor do Regulamento (CE) n.º 2042/2003 e que confere uma qualificação de nível equivalente pode continuar a realizar e/ou controlar esses ensaios” (Comissão Europeia, 2014, p. 4);
- iv) “os certificados de aptidão para serviço e os certificados autorizados de aptidão para serviço emitidos até à data de entrada em vigor do Regulamento (CE) n.º 1056/2008 por uma entidade de manutenção com a adequada certificação em conformidade com os requisitos do Estado-Membro são considerados equivalentes aos exigidos nos termos dos pontos M.A.801 e M.A.802 do anexo I (parte M), respetivamente” (Comissão Europeia, 2014, p. 4);

3.1.3 Aeronavegabilidade

A aeronavegabilidade pode ser considerada como sendo a capacidade de uma aeronave seguir e acolher os requisitos de segurança específicos, de desempenho e conformidade regular, estabelecidos pelas autoridades de aviação. Sendo assim, é uma descrição fundamental que garante a segurança das operações aéreas, bem como mantém a integridade das aeronaves (Cranfield University, 2023c).

A aeronavegabilidade divide-se em duas partes, a aeronavegabilidade inicial e a aeronavegabilidade continuada, ambas apontam para que seja possível coexistir a segurança de voo e uma operação aérea eficiente.

No que concerne à aeronavegabilidade inicial, esta diretamente relacionada com o projeto e o fabrico das aeronaves, ou seja, os engenheiros responsáveis pelo projeto e manufatura da aeronave têm de exercer as suas funções de acordo com o respetivo código de certificação (e.g., CS-23, CS-25, CS 27 e CS -29).

De forma a obter o necessário nível de aeronavegabilidade segundo (Tye, 1945, p. 355), os engenheiros e a aeronave têm de seguir certos requisitos sendo alguns destes:

- i) a criação de uma estrutura forte o suficiente de forma a suportar as cargas das diferentes operações da aeronave (descolagem, aterragem, voo e táxi);
- ii) a estrutura deve fornecer rigidez estrutural suficiente para evitar deterioração do controle e da estabilidade por distorções da estrutura;
- iii) devem existir mecanismos de alta confiabilidade e que providenciem alta estabilidade, controlo e eficiência;
- iv) deve estar patente uma rede de energia confiável, que permita que os instrumentos se mantenham devidamente calibrados para manter um voo seguro, apresentem alternativas para o caso de emergência e providenciem proteções para a minimização de danos em caso de acidente ou incidente.

Segundo (Cranfield University, 2023c) a atividade de projeto da aeronave é de enorme complexidade e tem como objetivo manter a segurança de voo e as operações de voo de forma economicamente eficiente tanto para o fabricante como para os operadores.

Assim, é a função das autoridades competentes determinar se uma aeronave se encontra dentro dos parâmetros e se cumpre todos os requisitos de certificação. Caso estes se verifiquem é atribuído, por essas entidades um Certificado Tipo (*Type Certificate (TC)*) (Cranfield University, 2023c).

Como indicado por Tye (1943, p.353) “it is clear that, if safety and efficiency of air transport are to increase, then airworthiness provisions must be ever more closely linked with the conditions under which the aeroplane operates”.

A aeronavegabilidade continuada é o processo em que a aeronave é submetida ao longo da sua vida útil de forma a manter a sua capacidade de voar e operar de forma segura e eficiente. Neste tipo de operação estão incluídas a manutenções e inspeções regulares e os seus respetivos

registros, bem como um acompanhamento regular das modificações e atualizações efetuadas na aeronave e as renovações e reparações (Cranfield University, 2023b).

Tal como referido por (Tye, 1945, p. 353) “if the shape of one of the elements is altered, all the adjacent elements must be altered to maintain a perfect fit”. Que claramente se refere a todas as modificações e atualizações efetuadas na aeronave.

Segundo (Cranfield University, 2023b), esta fase de manutenção implica a conformidade com o programa de manutenção atribuído pelo fornecedor e aprovado pela autoridade competente, sendo esta a *International Civil Aviation Organization* (ICAO) (Cranfield University, 2023b).

3.2 Tipos de estruturas aeronáuticas

Numa aeronave existem diversas estruturas aeronáuticas nomeadamente as asas, a fuselagem, a cauda e o trem de aterragem. Estes elementos estruturais devem estar preparados para suportar todo o tipo de forças exercidas na totalidade das condições de voo e em todas as etapas, bem como suportar as cargas que se encontram no diagrama V-n da aeronave. (e.g. carga útil e o peso do combustível).

A fuselagem é um componente estrutural de uma aeronave, esta tem a função de acomodar, a tripulação e os passageiros, bem como a carga e todos os outros instrumentos e equipamentos. Esta parte da aeronave também é uma base para acoplar as outras estruturas tais como as asas, as empenagens e em muitas aeronaves o motor e o trem de aterragem. Em termos de manutenção e inspeção necessária, em aeronaves de médio e grande porte, esta parte da aeronave é de difícil acesso na parte superior (The Editors of Encyclopædia Britannica, 2023a).

Ao longo dos tempos o tipo de fuselagem foi sendo alterado de forma a igualar os níveis de segurança necessários bem como suportar as forças que nesta se exercem, começando por ser construídas em treliças que consistia na junção de braços de forma a obter a estrutura.

Posteriormente, emerge a estrutura monocoque na qual se pode observar uma estrutura feita de compósitos ou de madeira (denominada de placa/casca) que tende a suportar maior parte das cargas, este tipo de fuselagem é composto por vários anéis que depois de montados dão a forma da fuselagem final.

Por fim, surge a fuselagem do tipo semi-monocoque, que também é possível verificar uma estrutura que está sujeita a esforços, sendo reforçada com uma estrutura interna composta de “*internal frames*”, “*longerons*” e “*stringers*” para uma melhor distribuição das cargas (CFINotebook, 2023).

No âmbito do projeto no qual se enquadra este trabalho é de realçar a altura tanto das asas como das empenagens horizontais e verticais, bem como a parte superior da fuselagem, em aeronaves de grande porte. Visto serem de difícil acesso, as inspeções efetuadas nestas superfícies tornam-se demoradas e trabalhosas, quando realizadas de forma manual, exigindo também um nível de segurança adequado para que não ocorram acidentes ou incidentes num ambiente de trabalho.

3.3 Aeronave de referência (C-130)

3.3.1 História do C-130

O desenvolvimento do Lockheed C-130 começou no início da década de 1950, sendo que em 1951 a Força Aérea Americana publicou pela primeira vez as especificações técnicas desta aeronave, constituída por quatro motores turbo hélice *Allison T56-A*-(11 ou 9), tendo sido denominada a sua primeira versão de C-130A (Air Force, 2023).

O primeiro voo do C-130 ocorreu a 1954 e desde então tem sido no mundo da aviação uma das aeronaves de transporte militar mais confiáveis, duráveis e amplamente utilizada em todo o mundo.

As primeiras entregas desta versão do avião ocorreram a partir de 1956 à Força Aérea Americana. Posteriormente, surgiu uma nova atualização no avião que implementava os motores T56-A-7, que começam o seu serviço também para a Força Aérea Americana a maio de 1959. esta nova variante é conhecida por C-130B (Air Force, 2023).

Em 1962 é revelado um novo modelo o C-130E, o qual era composto pelos mesmos motores que o anterior, no entanto, foram incluídos dois tanques extra de combustível externos. Este novo modelo apresentava um aumento de carga máxima à descolagem. O C-130H, uma nova versão revelada a 1974, introduziu novos motores turbo hélice T56-A-15 que permitiam o aumento ao nível da eficiência da aeronave sem afetar o desenho geral da mesma (Air Force, 2023).

A última atualização nesta aeronave ocorreu em 1999, com o C-130J. Esta variante teve como principais alterações a inclusão dos motores *Rolls-Royce AE2100D3*, turbo hélice, bem como a alteração para hélice de seis pás. Estas duas mudanças aumentavam a eficiência da aeronave a um ponto que nenhuma das outras versões tinha alcançado.

Estas alterações permitiram que a aeronave tivesse uma velocidade máxima de 417 mph, um peso máximo de descolagem de 74393 kgf e um alcance máximo com carga máxima de 1600 milhas náuticas, quando comparado com o seu modelo anterior o C-130H que só apresentava uma velocidade de 355 mph, uma carga máxima à descolagem de 69750 kgf e um alcance máximo com a carga máxima de 1050 milhas náuticas. O modelo C-130J também apresentou uma extensão de 4.57 m na fuselagem da aeronave (C-130J-30) que aumenta a sua capacidade de carga para 19595 kgf (Air Force, 2023).

O C-130 é conhecido pela sua versatilidade, podendo ser usado para o transporte de cargas ou tropas, evacuações médicas, lançamento de paraquedistas, reabastecimento aéreo e até mesmo missões de busca e salvamento. Esta aeronave pode transportar uma variedade de cargas que incluem veículos, equipamentos militares, abastecimentos, tropas e helicópteros de pequeno porte (Força Aérea, 2023a).

Uma das principais características desta aeronave é a capacidade de conseguir operar em pistas de comprimento curto e improvisadas sejam estas de terra batida, relva ou de gravilha. Esta

característica permite realizar as missões em locais remotos onde outras aeronaves teriam dificuldade em operar (Força Aérea, 2023a).

3.3.2 C-130 na Força Aérea portuguesa

Em 1959 teve início o transporte aéreo militar em Portugal, que introduziu uma ponte aérea entre Portugal e as províncias ultramarinas, com o exercício Himba. Devido ao agravamento da situação militar em África surge então uma procura para a melhoria dos transportes aéreos. Desta necessidade foram criados dois agrupamentos, o de Portela que operava com *Skymaster* e *Dakota* na base aérea 1 e o do Montijo que operava com o DC6 (Força Aérea, 2023b).

Após a saída de serviço do DC6 e da transferência das restantes aeronaves, foi criada em 1977 a esquadra 501, tendo sido marcada pela chegada do primeiro C-130H. Após diversos estudos efetuados esta aeronave revelou ser a que mais se adequava às necessidades que enfrentava a Força Aérea portuguesa. Com o acesso da Esquadra 501 a esta aeronave, tornou-se possível a realização de missões de complexidades variadas nas mais diversas áreas e em inúmeras partes do mundo (Força Aérea, 2023b).

Atualmente, na FA encontram-se 5 aeronaves C-130H, sendo que três destas são a versão C-130H-30, que apresenta um alongamento do original através do acrescento de dois anéis na sua fuselagem o que aumenta o comprimento total da aeronave, oferecendo assim uma maior capacidade de volume (podendo transportar mais volume de carga). A versão estendida permite o transporte de até 97 passageiros, enquanto a versão original apenas transportava 74 passageiros (WDMMA, 2023; Força Aérea, 2023b).

3.3.3 Especificações técnicas do C-130H e do C-130H-30

O Lockheed C-130H Hercules é uma aeronave de quatro motores turbo hélice, produzida pela empresa americana *Lockheed Martin Aeronautics Company*, anteriormente denominada por *Lockheed Corporation*.

Esta aeronave apresenta a configuração de asa alta e monopiano, de porte médio, empenagens do tipo convencional, cada um dos motores tem quatro pás, a asa é trapezoidal de enflechamento nulo e diedro nulo, trem retrátil e propulsão do tipo “puxa”, apresentando ainda uma rampa na parte traseira que permite a carga e descarga de veículos, pequenos helicópteros e saída de paraquedistas. Em seguida, nas tabelas 1 e 2, podem ser observadas as especificações técnicas do Hercules C-130H e C-130H-30 e na Figura 5 o Hercules C-130H.

| Parâmetro | | Parâmetro | |
|-----------------------|-------------------|---------------------------|-----------|
| Motor | Allison T-56-A-15 | Peso máximo na descolagem | 69750 kgf |
| Potência | 19640 HP | Peso máximo da carga | 18200 kgf |
| Comprimento | 29.79 m | Distância para descolagem | 457.2 m |
| Envergadura | 40.41 m | Distância para aterrar | 716.28 m |
| Altura | 11.65 m | Teto de serviço | 10688 m |
| Diâmetro da fuselagem | 4 m | Raio de ação | 3240 km |
| Velocidade máxima | 589 km/h | Combustível | 23200 L |
| Alcance máximo | 6480 km | Passageiros | 92 |
| Autonomia máxima | 13 horas | Infantaria/Paraquedistas | 78/64 |
| Peso vazio | 36300 kgf | Tripulação | 6 |

Tabela 1: Especificações técnicas Hercules C-130H

Fonte: (Força Aérea, 2023a)

| Parâmetro | | Parâmetro | |
|-----------------------|-------------------|---------------------------|-----------|
| Motor | Allison T-56-A-15 | Peso máximo na descolagem | 69750 kgf |
| Potência | 19640 HP | Peso máximo da carga | 15900 kgf |
| Comprimento | 34.36 m | Distância para descolagem | 457.2 m |
| Envergadura | 40.41 m | Distância para aterrar | 716.28 m |
| Altura | 11.65 m | Teto de serviço | 10688 m |
| Diâmetro da fuselagem | 4 m | Raio de ação | 3240 km |
| Velocidade máxima | 589 km/h | Combustível | 23200 L |
| Alcance máximo | 6480 km | Passageiros | 128 |
| Autonomia máxima | 13 horas | Infantaria/Paraquedistas | 114/92 |
| Peso vazio | 36600 kgf | Tripulação | 6 |

Tabela 2: Especificações técnicas Hercules C-130H-30

Fonte: (Força Aérea, 2023a)

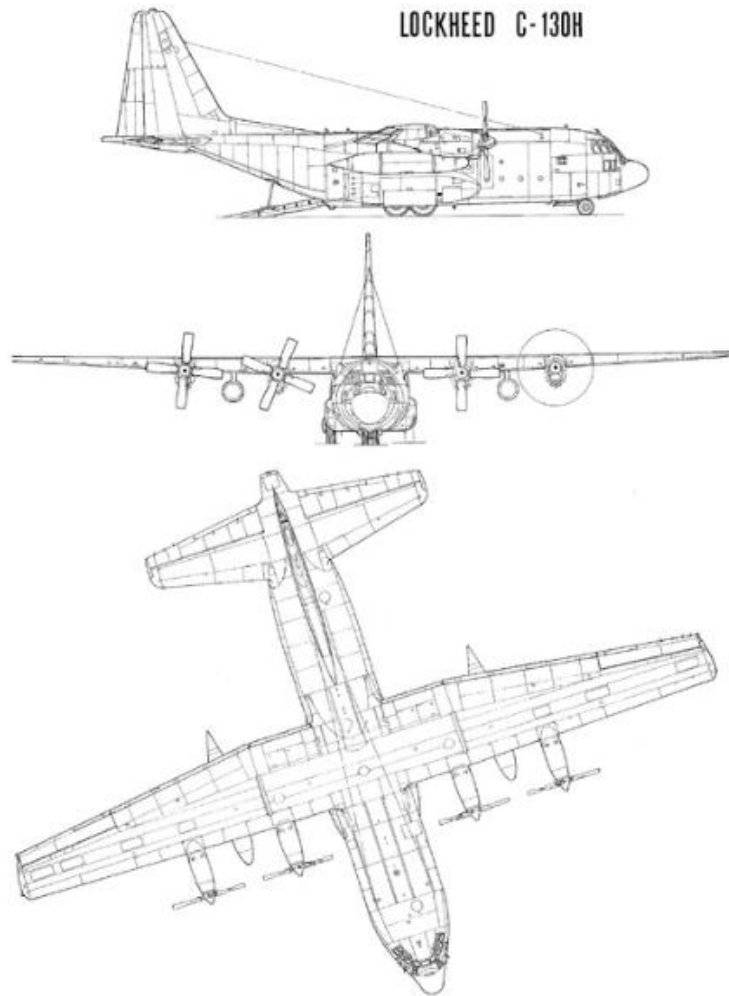


Figura 5 Vistas da aeronave Hercules C-130H

Fonte: (Saranga, 2023)

3.4 Apresentação do projeto

A manutenção e inspeção de aeronaves, como referido anteriormente, são procedimentos fundamentais que garantem a segurança e as operações aeronáuticas tanto comerciais como militares.

A inspeção por meios tradicionais da superfície de corpos fuselados é realizada por equipas técnicas no solo que utilizam plataformas, pórticos e até mesmo a remoção de painéis para inspeção, de forma a identificar quaisquer alterações da superfície que se tenham dado ao longo do tempo (State Compensation Insurance Fund, 2023).

À medida que há avanços da tecnologia, surgem, inevitavelmente, novas abordagens para a resolução de problemas e facilitar os processos de inspeção. Uma dessas novas abordagens é o uso de drones para facilitar e otimizar os processos de inspeções realizados em aeronaves. O uso

desta ferramenta em conjunto com técnicas de identificação de alterações de superfície fazem a base do projeto em que este trabalho se insere (State Compensation Insurance Fund, 2023).

O projeto envolve um conjunto de empresas, de universidades e de entidades independentes onde cada um tem a sua função para que este projeto tenha êxito e consiga alcançar os seus objetivos.

O trabalho envolve o uso de um drone para auxiliar a inspeção de superfícies com painéis pertencentes à fuselagem do C-130, fotografando as mesmas e analisando de forma digital se há ou não alguma alteração da superfície. As superfícies para as quais este projeto tem o seu principal foco são as zonas superiores da aeronave, incluindo a deriva e o extradorso da asa.

Nestas superfícies de difícil acesso estão incluídas as asas, principalmente o extradorso das mesmas, as empenagens vertical e horizontal, bem com qualquer superfície fuselada que se encontre, acima da cota de 1.8 m (zona de referência abaixo da qual se considera que um mecânico tem acesso direto sem necessitar apoio de equipamentos para acesso).

O bom uso desta ferramenta poderá trazer muitas vantagens e benefícios para a arte da inspeção e manutenção de uma aeronave, nomeadamente o melhoramento da eficácia e a rapidez do processo como um todo quando comparado com os métodos tradicionais,

Um outro benefício do uso de drones para a realização da inspeção é a precisão que os mesmos oferecem durante o processo, pois a tecnologia de identificação de alterações da superfície de forma digital pode ser de tal modo avançada que poderá detetar alteração que a olho nu não seriam documentadas. Uma das vantagens deste método que favorece não só as companhias aéreas como também a nível militar é a possibilidade de uma manutenção preditiva, pois devido à sua elevada precisão permite identificar os problemas no início da sua evolução podendo assim evitar problemas futuros (Dhital, 2023).

Do ponto de vista operacional, em termos de uso de drones um dos desafios mais significativos diz respeito a inspeções realizadas no interior de hangares, uma vez que por regra não há acesso a sinal GPS o que implica voo com condições de navegação distintas.

A técnica de retirada das imagens, obviamente será realizada através do drone onde por rotas de voo já predefinidas, este irá realizar um vídeo em torno da aeronave e a partir desse vídeo serão então retiradas imagens como uma espécie de “*printscreen*” do vídeo da localização onde serão retiradas estas imagens irá depender das imagens de referência fornecidas de forma a igualar e alinhar conforme as mesmas.

A distância do drone à aeronave pode variar dependendo da câmara e da amplitude do cone de retirada das imagens, ou seja, a ampliação do vídeo retirado, pois o objetivo é acabar com imagens que na realidade representem uma área de um metro quadrado ou seja que tenham um metro de altura por um metro de comprimento.

3.5 Alterações em superfícies de aeronaves (“*findings*”)

Os “*findings*” numa aeronave são referentes a alterações da superfície da fuselagem da aeronave que geralmente são identificados durante os processos de inspeção, de testes ou de

investigações. Estes poderão indicar possíveis problemas, danos ou anomalias, na estrutura da aeronave.

A identificação destas alterações da superfície requer uma análise detalhada, ou seja, necessita de ser realizada por profissionais qualificados, que as devem documentar e monitorizar conforme os procedimentos de manutenção e reparação estabelecidos, de forma a garantir segurança contínua das operações aéreas.

Estas alterações de superfície podem variar em gravidade e podem também incluir uma variedade de problemas desde questões menores que requerem ajustes simples (e.g. sujidade), até problemas mais sérios que necessitam de reparações mais profundas para corrigir condições que vão desde corrosão, erosão a fugas de fluidos.

3.5.1 Caracterização das alterações da superfície

Nesta parte é feita uma caracterização de algumas das possíveis alterações da superfície, de forma a ter-se uma ideia de como podem afetar a integridade das aeronaves bem como a segurança de voo.

A corrosão e erosão são dois processos de dano de material que afetam a integridade e os desempenhos dos diferentes componentes aeronáuticos, nestes estão incluídas todas as estruturas das aeronaves. Ambos os fenómenos têm uma elevada importância de monitorização, de forma a garantir a segurança e a eficiência operacional das aeronaves.

A erosão numa aeronave está diretamente relacionada com o desgaste progressivo proveniente do impacto de partículas, que vão desde água a partículas sólidas durante o voo tais como areias, poeiras e até mesmo partículas de gelo.

Devido as elevadas velocidades que a aeronave atinge durante o voo, tanto no cruzeiro como nas restantes fases de voo, estas partículas sólidas batem contra as superfícies da aeronave transferindo energia para as mesmas.

Como referido por Rowbotham (2023): *“Aircraft leading edges suffer erosion from water droplets and solid particles which strike at high speed in flight and can cause unsightly damage as well as the potential for more serious structural problems”*.

Durante o processo de erosão numa aeronave existem áreas de elevado interesse de monitorização, estes elementos estruturais são caracterizados por estarem expostos diretamente aos impactos das partículas anteriormente referidas, nomeadamente o nariz do avião, os bordos de ataque da deriva e das asas e as pás dos motores (Rowbotham, 2023).

Este tipo de alteração da superfície poderá levar a uma diminuição da eficiência aerodinâmica, já que as superfícies de contacto tendem a ficar irregulares, bem como a uma diminuição da capacidade estrutural pois existe perda de material durante o processo. Noutros casos, a consequência é o aumento do consumo de combustível já que as pás apresentam uma alteração do seu formato causada por este fenómeno (AV&R, 2023).

A corrosão (exemplificada na Figura 6) é um problema comum em estruturas metálicas e infelizmente na indústria aeronáutica não é uma exceção. Apesar de estudos efetuados e avanços

tecnológicos tanto em materiais de construção aeronáutica como em camadas protetoras como tintas, o efeito da corrosão acaba sempre por prevalecer. Então de forma a manter a integridade das estruturas aeronáuticas são necessárias manutenções e inspeções regulares (Aero Corner, 2023).

Este efeito é causado quando partes metálicas da aeronave são expostas ao oxigênio, o que inevitavelmente causa a oxidação do metal. Este processo pode ser acelerado por vários fatores como por exemplo o contato com poluentes, líquidos que tenham sido libertados pela própria aeronave por meio de fugas ou até mesmo chuvas ácidas (Aero Corner, 2023).



Figura 6:Exemplo de corrosão do C-130 localizada no estabilizador horizontal

Fonte: (Aeromec, 2023)

Os diferentes tipos de corrosão são classificados em diferentes categorias, e na indústria aeronáutica existem alguns que são mais comuns e que prevalecem. Um destes exemplos é a corrosão por esfoliação (exemplo na Figura 7) que ocorre normalmente em rebordos de peças. Isto torna-se visível principalmente em parafusos e rebites, bem como nas junções entre painéis, este tipo de corrosão faz um certo relevo na superfície o que cria tensões adicionais no grão do metal o que faz com que este seja mais frágil (American HandForge, 2023).

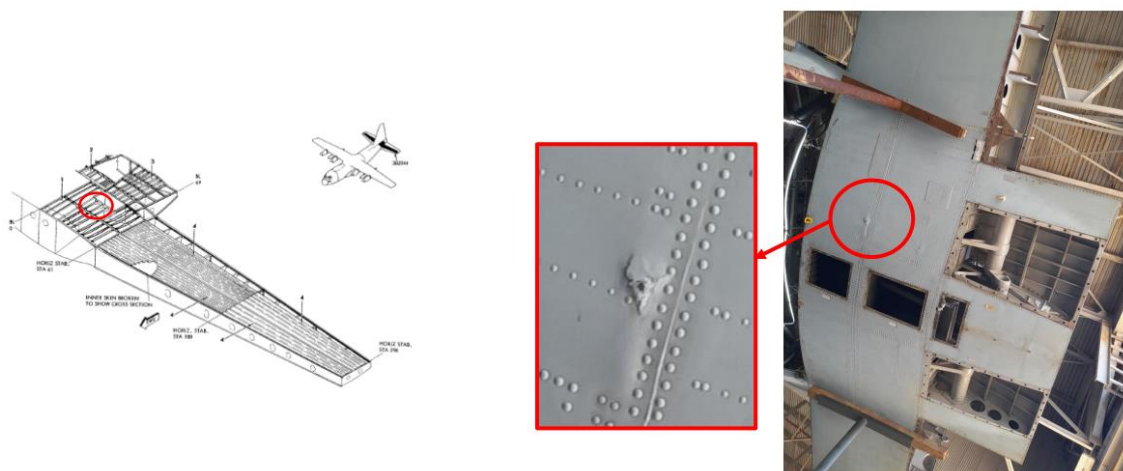


Figura 7:Exemplo de corrosão por esfoliação do C-130 localizada no estabilizador horizontal

Fonte: (Aeromec, 2023)

Outro tipo de corrosão típicos na indústria aeronáutica é a corrosão por pites (Figura 8), que se forma perpendicularmente sobre chapas metálicas criando profundidade na mesma, isto faz com que exista uma diminuição da força que a estrutura pode suportar devido à ausência de material, o que pode causar a fissura por fadiga (Czaban, 2018, p. 9).



Figura 8: Exemplo de corrosão por pites

Fonte: (Yaang, 2022)

Existe também, a corrosão em frestas e tal como o próprio nome indica cria-se maioritariamente em aberturas ou fendas, como por exemplo entre placas ou até mesmo em parafusos, esta cria-se a partir de depósitos de algum tipo de líquido (e.g. água ou óleo), que permite a passagem de eletrões entre as duas superfícies da abertura. Tal como a corrosão por pites, este tipo de corrosão decompõe o metal envolvido diminuindo a tensão máxima da estrutura e pode levar a uma fissura na mesma (Czaban, 2018, p. 10).

Tal como a corrosão em frestas (Figura 9), o exemplo da corrosão galvânica é muito semelhante no sentido que neste tipo de corrosão existe passagem de eletrões, no entanto neste caso o cátodo e o ânodo estão em contacto direto. A corrosão galvânica apresenta um grande problema pois existe numa aeronave o contacto direto entre muitos materiais onde pode ocorrer este tipo de corrosão (Czaban, 2018, p. 11).

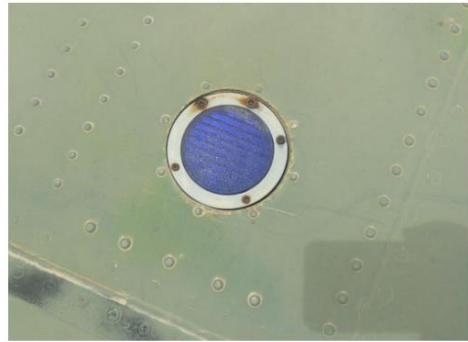
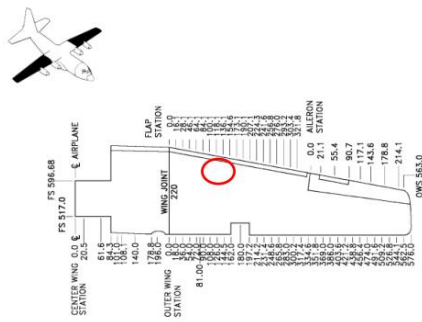


Figura 9: Exemplo de corrosão em frestas em parafusos do C-130 localizada na parte central da asa

Fonte: Aeromec (2023)

A fissura (Figura 10) pode ocorrer em qualquer parte da estrutura que esteja sujeita a forças de tração ou a vibração. A fissura ocorre quando os níveis de tensão são elevados o suficiente para que a estrutura ceda apesar destes valores poderem estar dentro dos limites para os quais a estrutura foi originalmente desenhada, no entanto devido à fadiga dos materiais acabam por ceder (Aero Corner, 2023).

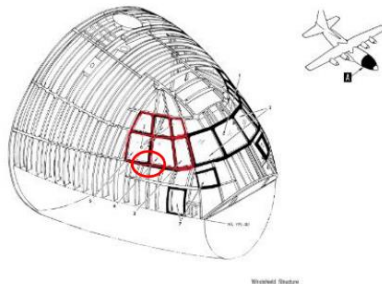


Figura 10: Exemplo de fissura no C-130 localizada no cockpit

Fonte: Aeromec (2023)

As indentações, como ilustrado na Figura 11, representam uma forma de modificação superficial que afeta a geometria da fuselagem da aeronave. Essa alteração na geometria pode impactar a sua eficiência e comprometer a integridade estrutural, uma vez que a geometria original foi modificada. Além disso, tais indentações também podem contribuir para reduzir a vida útil das estruturas devido à fadiga.

As indentações verificam-se quando a parte de uma chapa de uma superfície de uma aeronave é empurrada para dentro criando uma profundidade. Isto pode ser causado por várias situações, como o impacto de pedras que estejam na pista, o bater dos carros que prestem serviço à aeronave ou até mesmo o impacto de aves (Lafiosca, Fan, & Avdelidis, 2023, p. 2).



Figura 11: Exemplo de uma deformação da casca do C-130 localizada no estabilizador vertical

Fonte: Aeromec (2023)

Nas aeronaves é possível encontrar uma variedade de fluidos (e.g. combustível, óleo e água) que são essenciais para o funcionamento da mesma. Existem situações onde há a fuga destes fluidos que não são previstas e prejudicam a eficiência da aeronave bem como a integridade da estrutura (Cordero, 2023).

Uma fuga trata-se, portanto, de um verter indesejado de um fluido sobre uma superfície, que pode ser causada por um buraco nos painéis do avião, um selante em mau estado (que também é considerado como uma alteração da superfície) ou até mesmo por uma fissura de um dos tanques destes fluidos.

As fugas não afetam somente o sistema de combustível, mas perturba também os sistemas hidráulicos, os sistemas de travão, sistemas pneumáticos entre outros. Portanto é essencial uma inspeção constante de possíveis fugas, pois estão associadas a sistemas de elevada importância para o bom funcionamento da aeronave (Cordero, 2023).

A tinta colocada na fuselagem dos aviões tem funções diferentes, para além de dar beleza ao mesmo, por isso a alteração da superfície falta de tinta ou descasque de tinta (Figura 12) apresenta problemas que vão para além da estética. A tinta serve principalmente como uma camada protetora do calor e dos raios UV pois a uma altitude de cruzeiro os níveis dos raios UV são praticamente o dobro que no solo, sendo que se houver falta desta camada protetora tanto os raios ultravioleta como o calor provocam danos nas estruturas expostas (One Monroe Aerospace, 2022).

A camada protetora oferece uma maior capacidade de as estruturas resistirem à corrosão, ou seja, zonas da fuselagem que tenham sofrido desta alteração da superfície encontram-se mais propícias à corrosão através do contacto direto da humidade que se encontra no ar e chuva e também se encontra vulnerável até mesmo à erosão. Uma manutenção das zonas afetadas por este “*finding*” irá prolongar a vida útil da aeronave preservando a sua fuselagem bem como outras peças expostas aos elementos como é o caso dos motores e do trem de aterragem (One Monroe Aerospace, 2022).

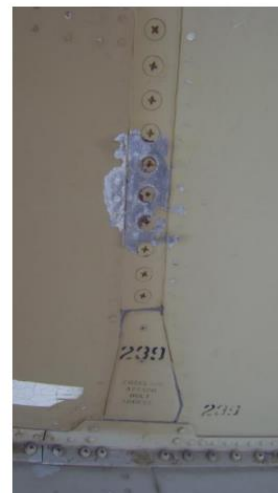
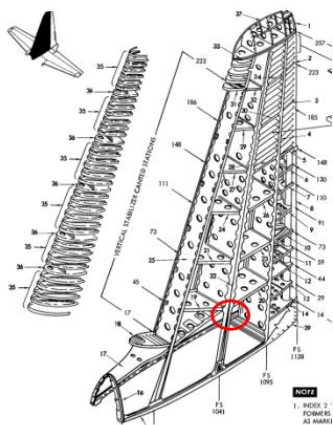


Figura 12: Exemplo de falta de tinta no C-130 localizada no estabilizador vertical

Fonte: Aeromec, (2023)

Uma janela partida é considerada uma alteração da superfície, que não se trata apenas de um elemento pertencente à fuselagem, mas também do interior da cabine. As janelas de uma aeronave são feitas de acrílico, sendo assim são relativamente fortes, no entanto não exclui a possibilidade de estas apresentarem anomalias como riscos ou até mesmo uma camada dos acrílicos partida (Lim, 2023).

A manutenção e a inspeção desta alteração da superfície é de especial importância, pois caso todas as camadas (“*inter*”, “*middle*” e “*outer*”) partirem ou tiverem algum tipo de fuga como um furo ao longo do voo, irá haver uma descompressão da cabine (Lim, 2023).

De igual modo a falta de um componente ou peça pode não ser um fator que obrigue a aeronave a ficar no solo até que a alteração da superfície seja corrigida, no entanto é necessário que seja documentada e que seja corrigida assim que possível, pois pode apresentar problemas futuros que obrigam a aeronave a ficar no solo ou até mesmo a longo prazo que causem algum tipo de incidente ou acidente (Aviation Manuals, 2023).

A falta de um componente pode ser verificada tanto dentro como fora da cabine, no caso do exterior existem alguns exemplos como a falta de um parafuso/rebite (Figura 13) ou a falta de parte da pintura, que apesar de necessitarem de ser corrigidos não forçam a aeronave a ficar no solo. No entanto a falta de uma roda ou a falta de um painel, obviamente, são razões que param as operações da aeronave (Aviation Manuals, 2023).

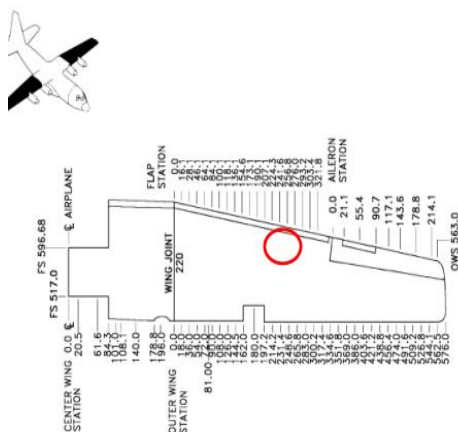


Figura 13: Exemplo da falta de um rebite do C-130 localizada perto do bordo de fuga da asa

Fonte: Aeromec, (2023)

A falta de um sistema aplica-se da mesma forma que o anterior onde estes podem ou não forçar a paragem das operações da aeronave, no entanto é necessária tanto a sua correção assim que possível como a sua documentação.

Com o intuito de verificar se a aeronave se encontra ou não apta a operar, existe a *minimum equipment list* (MEL) na qual estão indicados os equipamentos e os sistemas essenciais à operação da aeronave de modo a manter o nível de segurança, logo todos os restantes equipamentos são “dispensáveis” (Aviation Manuals, 2023).

Os “riscos” (Figura 14) são uma alteração da superfície comum nas aeronaves que por definição são defeitos nas superfícies da aeronave que apresentam uma pequena profundidade, têm os seus limites bem claros e são um defeito “longo” e são normalmente provocados por algo que passe na superfície que seja pequeno e afiado (e.g. pedras ou granizo). Estes defeitos são causados pela fricção entre a superfície e os objetos que se movem ao longo da mesma (Alexander, 2023).

Estes “*findings*” têm a sua importância no que diz respeito à sua reparação, pois podem evoluir causando a corrosão porque o metal pode ficar exposto, bem como podem transformar-se numa fissura, então, de forma a prevenir estas situações, é possível polir a superfície para que os mesmos desapareçam (se o risco não for profundo demais) (Alexander, 2023).

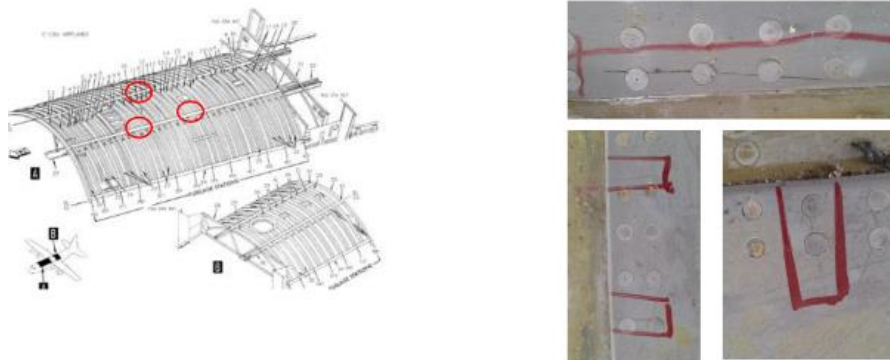


Figura 14: Exemplo de um risco do C-130 localizada na parte superior da fuselagem

Fonte: Aeromec (2023)

Existem, no entanto, uma variedade elevada de alterações da superfície que são possíveis de identificar numa aeronave, por exemplo antenas danificadas que podem afetar os sistemas de comunicação ou de navegação e assim comprometem a eficácia das transmissões e receções diminuindo, deste modo, os níveis de segurança. Os elementos distorcidos, que também se enquadram nos tipos de alteração da superfície e que podem ser resultado de impactos, bem como de alto stress afetando a resistência e o desempenho estrutural da aeronave.

A descoloração é um “*finding*” que apesar de não ter relevância imediata pode propagar-se para um caso de falta de tinta. A acumulação de pó também é relevante no sentido que pode obstruir locais de elevada importância da passagem de ar (tubo de pitot) e causar a longo prazo a corrosão dos materiais. O mesmo se pode referir sobre a sujidade que pode afetar componentes mecânicos e até mesmo sistemas aerodinâmicos.

A separação e o desalinhamento entre placas da fuselagem é um “*finding*” de extrema relevância pois estes são “sinónimos” de que a estrutura já não tem as mesmas propriedades mecânicas que tinha e simultaneamente altera a eficiência aerodinâmica da aeronave, portanto devem ser abordados de forma a manter os níveis de segurança necessários ao longo das operações.

Identificar, documentar e corrigir precocemente todo o tipo de alterações da superfície (resumidas na Tabela 3) é um processo fundamental para manter a aeronave em conformidade com os padrões de segurança e de desempenho. Portanto, inspeções regulares e ações corretivas consoante a situação que se apresenta, são essenciais no processo de manutenção e que preservam a integridade estrutural e operacional da aeronave bem como a segurança dos passageiros e tripulação.

| Alteração | Características físicas |
|---------------------|------------------------------------|
| Corrosão | Cor, forma, textura e luminosidade |
| Erosão | Cor, forma, textura e luminosidade |
| Fissura | Forma e dimensão |
| Indentação | Forma e dimensão |
| Fuga | Cor |
| Alterações na tinta | Cor, textura e forma |
| Janela partida | Forma e dimensão |
| Falta de componente | Textura, cor e luminosidade |
| Riscos | Forma, cor e luminosidade |

Tabela 3: Características físicas de cada alteração de uma superfície de uma aeronave

Fonte: (criação do próprio autor, 2023)

Capítulo 4 - Sistemas automáticos de detecção de alterações da superfície

No atual capítulo, estão reunidas as diferentes abordagens para o processamento de imagens, envolvendo etapas como o pré-processamento das imagens, os elementos de análise durante o processamento e as técnicas para detetar alterações nas imagens. Cada uma dessas abordagens é examinada em termos das suas vantagens e desvantagens, e como podem ser aplicadas em várias situações de alterações nas imagens. Por fim, será discutido como os resultados obtidos nos processamentos de imagem serão avaliados, bem como a metodologia de imagem selecionada para completar os objetivos da dissertação.

Os sistemas automáticos de detecção de *findings* são tecnologias que utilizam um conjunto de ferramentas, de forma a alcançar o objetivo de identificar o local onde na imagem houve alguma alteração. Estes sistemas utilizam um conjunto de algoritmos, inteligência artificial e o processamento de imagem, para identificar as discrepâncias, alterações ou problemas em imagens e até mesmo em vídeo.

Estes sistemas são amplamente utilizados em diversas áreas que incluem inspeções industriais, controlo de qualidade, monitorização de segurança, na área da saúde e no caso deste trabalho na área da manutenção de aeronaves (Tavares, 2010, pp. 4-7).

Existem, no entanto, inúmeros métodos para a análise de imagem e conseqüentemente diversos métodos para identificação de alterações em imagens, não existindo assim um método geral de detecção de alterações, ficando ao cargo dos utilizadores adaptar uma das metodologias à aplicação para a qual querem obter resultados (a lógica utilizada pode ser verificada na Figura 15).

Neste capítulo serão abordados os princípios do pré-processamento de imagem, técnicas de detecção de alteração em imagens, bem como a avaliação após o processamento, incluindo também a caracterização de algumas delas, as limitações e os itens de análise que podem ser utilizadas.

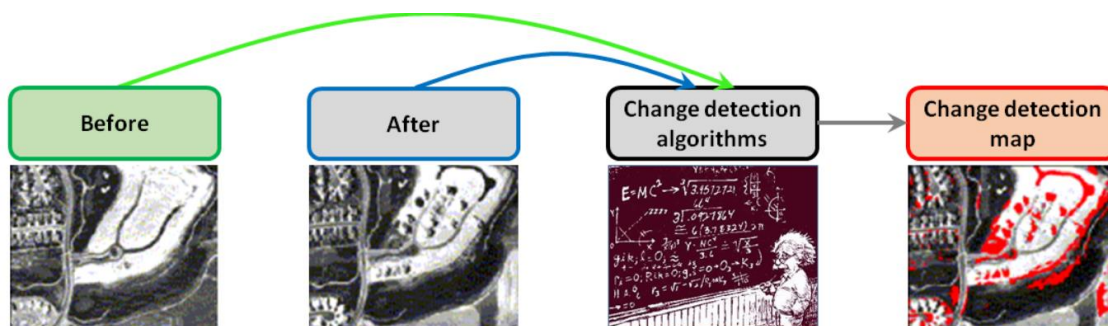


Figura 15: Lógica utilizada para a detecção de alterações

Fonte: (Shukka Methods, dez2023)

4.1 Pré-processamento de imagem

O pré-processamento de imagem é essencial para a eventual análise e processamento de imagens em formato digital. De forma que os programas obtenham os resultados desejados este é um passo obrigatório que inclui não só o redimensionamento das imagens, a sua orientação, a correção de cores bem como outros aspetos que podem ser alterados dependendo do estudo que se queira realizar (Great Learning Team, 2023).

Este passo, portanto, envolve a utilização de filtros que permitem remover quaisquer ruídos (e.g. distorções) que existam na imagem original, suavizar a imagem e realçam características específicas na imagem, importantes para cada um dos diferentes estudos. Por outras palavras, o pré-processamento da imagem é o passo que “limpa” a mesma para que esta fique apta a ser analisada pelo devido algoritmo que será utilizado no estudo (Nelson, 2023).

O redimensionamento da imagem é uma alteração que em muitos algoritmos é um passo comum, já que se não forem alimentadas imagens quadradas ou de uma certa dimensão a muitos destes algoritmos os resultados não estarão corretos ou o programa simplesmente não funciona e como muitas capturas de imagens realizadas não apresentam a forma quadrada ou a dimensão correta para a análise, o redimensionamento da imagem torna-se muitas vezes um passo do pré-processamento essencial (Krig, 2014, pp. 42-49).

A reorientação de uma imagem é uma técnica no pré-processamento de imagens que envolve a alteração da orientação espacial ou a posição da imagem para que seja armazenada no disco de forma que posteriormente o algoritmo de processamento consiga gerir a imagem. Este passo torna-se útil quando é necessário alinhar a perspetiva da imagem para poder comparar-la com uma imagem de referência (Krig, 2014, pp. 42-49), por exemplo.

A redução do ruído é outra técnica de pré-processamento de imagem que permite numa imagem retirar ruído da mesma que pode ser causada por baixa luminosidade ou partes da imagem perdidas ou modificadas em alterações de formatos. Sendo assim, esta técnica aponta para manter a imagem “limpa” mantendo o seu formato original e a sua essência para o estudo.

O melhoramento de contraste é um processo que envolve o aumento do contraste entre as diferentes partes da imagem ficando as mesmas mais fáceis para o programa as distinguir. Semelhantemente, tem-se a correção de cores dentro da imagem que também torna a distinção das diferentes peças dentro de uma imagem mais claras de processar por parte do algoritmo utilizado (Krig, 2014, pp. 42-49).

A segmentação é uma técnica de pré-processamento que permite realçar áreas de elevado interesse, tornando-se uma técnica útil quando se pretende estudar parte da imagem que tem de ser isolada da restante. Para o âmbito deste projeto, esta técnica torna-se relevante quando é pretendido o estudo de, por exemplo, parte da fuselagem como uma janela, o avanço da corrosão em rebites, entre outras circunstâncias onde o isolamento de uma parte da imagem torna-se importante para a avaliação das alterações da superfície (Nelson, 2023).

Semelhante ao anterior e também com relevância neste projeto, é a extração de características, que como o nome indica identifica aspetos relevantes dentro de uma imagem. Em paralelo permite o reconhecimento de objetos o que para o estudo de alterações da superfície

torna-se importante, pois poderá identificar partes como janelas, *flaps* ou outro tipo de estrutura, permitindo o estudo com foco nessas partes.

Concluindo, o objetivo do pré-processamento é a melhoria da qualidade das imagens para que sejam analisadas corretamente, dependendo do trabalho que se queira realizar e o estudo pretendido sobre as imagens. Para este caso em específico de identificação de alterações da superfície, os métodos que melhor se adaptariam seriam não só o redimensionamento das imagens e o melhoramento do contraste bem como a segmentação e a extração das principais características da imagem.

4.2 Escolha da técnica de detecção de alterações

Nesta parte serão apresentados diferentes métodos de análise de imagem bem como as suas características e limitações. Esta etapa é dividida segundo Andrew P. Tewkesbury (2015, p. 2) em quatro partes nomeadamente o “*input*” da imagem, os itens de análise utilizada, o método de identificação de alterações utilizado e o “*output*” do resultado da análise que pode ser apresentado de diversas formas uma delas sob a forma de um mapa de cores onde alterações foram detetadas.

4.2.1 Itens de análise

Os itens de análise que identificam as alterações numa imagem são parâmetros utilizados de forma a quantificar e descrever mudanças que ocorreram na imagem, sendo estes itens fundamentais para o entender das alterações ocorridas, bem como para estabelecer uma comunicação entre o algoritmo e a imagem. Existem diferentes itens de análise numa imagem em que cada um é usado para descrever diferentes mudanças específicas.

O pixel é o elemento mais básico de imagem digital, onde uma rede de pixéis formam, portanto, uma imagem. Os pixéis são representados através de uma matriz bidimensional onde são devidamente numerados, a quantidade de pixéis que se encontram em cada uma das dimensões irá determinar a resolução da imagem.

Este item é utilizado para comparação de imagens principalmente em imagens de áreas terrestres retiradas por satélite, ou seja, para identificar mudanças nos terrenos sejam estas a urbanização ou desflorestação. Os métodos que utilizam este item comparam pixel a pixel nos níveis de intensidade luminosa bem como a mudança de cor em cada um deles (Tewkesbury, Comber, Tate, Lamb, & Fisher, 2015, pp. 2-5).

No entanto, apesar de ser um item que represente bem as alterações de brilho e cor, pode vir a ter complicações quando a qualidade das imagens é aumentada, o processo fica então limitado para o tipo de alteração que se pretende estudar, uma destas alterações poderá ser a alteração da geometria ou posicionamento dos diferentes elementos da imagem que para o caso onde este projeto se enquadra apresenta problemas quando temos os “*findings*” de partes em falta ou o desalinhamento.

Apesar das limitações claras deste item de análise, pode ser útil a sua utilização no âmbito deste projeto quando são apresentados alguns “*findings*” nomeadamente a alteração da superfície de falta de tinta, ou descoloração ou até mesmo a corrosão, pois, nestas áreas afetadas das imagens existe, portanto, uma alteração da cor, que é um fator que no estudo pixel a pixel é tomado em consideração.

O “*pixel kernel filter*” é uma técnica usada para o processamento de imagem que permite realizar operações de filtragem e manipulação dos pixels, que utiliza pixels adjacentes de um pixel central dando um novo valor a este e serve para identificar alterações e filtrar ruído, utilizada maioritariamente para desfocar áreas de menor interesse utilizando matrizes de 3 por 3 de pixels e dando um valor igual a estes pixels tornando-o um só pixel. Como no caso anterior, trata-se, portanto, de um método que para este projeto pode não identificar certas alterações, também trazendo outra problemática que envolve a supressão de características importantes, devido a haver uma média da coloração e luminosidade dos pixels que rondam o pixel central (Powell, 2023).

A sobreposição de objetos em imagens tem por base o processo de segmentação de uma das imagens onde são realçados os objetos do estudo. Após feita a segmentação a imagem é então sobreposta com outra de forma a identificar alterações, o que pode oferecer melhor dados em relação a mudanças de textura, cor e até mesmo alteração de padrões, no entanto, tal como na anterior generaliza os dados podendo ficar de fora da análise alterações de elevado interesse e este método não permite a análise de mudança de forma e tamanho já que a segmentação é realizada em uma só imagem de referência (Tewkesbury, Comber, Tate, Lamb, & Fisher, 2015, p. 5).

Esta técnica, quando pensada para o âmbito deste projeto, pode ser utilizada para identificar partes que sofreram de corrosão ou erosão já que aquando destas alterações os padrões dentro das áreas salientadas na segmentação são alterados, sendo possível serem detetados. Esta técnica permite ainda detetar a falta de tinta ou o descasque de tinta, bem como a falta de equipamentos e partes, no entanto como a imagem retirada não sofre a segmentação e quando as duas imagens são sobrepostas as alterações de geometria são de difícil deteção, ou seja, as endentações, as distorções, os desalinhamentos ou fissuras, não são viavelmente identificados por este meio.

A comparação de objetos dentro de imagens é um outro item de análise de comparação, muito semelhante à da sobreposição já que utiliza a segmentação como base do seu processo, mas neste caso as duas imagens são segmentadas permitindo assim que os objetos dentro das imagens sejam comparados independente do facto de haver uma alteração da posição dos objetos de estudo bem como a sua geometria e tamanho, podendo assim estes fatores de alteração da forma e dimensão serem comparados (Tewkesbury, Comber, Tate, Lamb, & Fisher, 2015, p. 5).

Na maior parte dos casos em que se utiliza este método é feita uma recolha das características de cada um dos objetos do estudo que incluem a cor, o tamanho, a textura, a forma, entre outros, estes atributos são então comparados diretamente entre as duas imagens retiradas em tempos diferente, neste caso trata-se então das imagens de referência que são retiradas sem qualquer alteração da superfície ou com alterações da superfície toleráveis e a imagem que é retirada durante o processo de inspeção.

Uma das desvantagens deste item é o facto de a segmentação das imagens ser muito sensível, ou seja, basta uma alteração da luminosidade, do ângulo de onde foi retirada a imagem ou uma alteração na distância de onde foi retirada, que a imagem coletada durante o processo de inspeção poderá apresentar alterações quando comparada com a imagem de referência, que na realidade pode nem existir na superfície sendo que estas alterações na realidade não existem na superfície (Tewkesbury, Comber, Tate, Lamb, & Fisher, 2015, p. 5).

No âmbito deste projeto este item é viável se forem removidas partes que não se pretendem estudar ou inspecionar dentro da imagem focando-se somente em atributos que têm uma maior importância em cada uma das imagens, no entanto pode ocorrer terem de ser suprimidas durante este processo de filtragem alterações de elevada relevância.

Apesar das desvantagens, este método continua a ser útil quando se pretende identificar alterações que apresentam mudança de forma e tamanho como as *indentações*, a corrosão, as fugas, as alterações que alterem a pintura, entre outras.

Uma outra técnica é a comparação de objetos de imagens multitemporais que é muito semelhante ao anterior, com o incremento, de que neste caso é analisada uma série de imagens retiradas ao longo do tempo. Isto permite que se evite perder informações importantes ou “*findings*” significativos, já que se uma alteração for visualizada em várias imagens não se trata então de uma “falsa” alteração proveniente da segmentação, como foi explicado para o caso anterior (Tewkesbury, Comber, Tate, Lamb, & Fisher, 2015, p. 5).

Para este estudo, esta técnica só se apresenta útil a longo prazo, por ser possível estudar a “progressão”, de uma alteração da superfície anteriormente documentada como por exemplo a corrosão.

No entanto, esta técnica pode ser utilizada se forem retiradas múltiplas imagens durante o mesmo processo de inspeção e assim permitir diminuir o problema da sensibilidade da segmentação, pois seria possível intercalar as mesmas e eliminar as “falsas” alterações, que podem ocorrer. Em contrapartida pequenas alterações que não sejam visíveis em algumas das imagens também irão ser filtradas e generalizadas, bem como a forma e o tamanho, já que irá ser feita uma espécie de média entre as imagens.

O método dos polígonos vetoriais delimita áreas de interesse e permite quantificar essas regiões (formato, tamanho, cor e luminosidade) numa imagem. Este item unifica pontos através de vetores colocados ao longo das fronteiras destas áreas (janelas, *flaps*, placas ou pintura) criando assim um polígono fechado (Figura 16).

Este processo só se prova útil a longo prazo pois permite estudar o avanço das características mencionadas com o passar do tempo, não se tornando viável para o âmbito deste projeto. Além desta desvantagem como são tratados dados que se pretende estudar até ao maior detalhe possível, ao utilizar este item perde-se inevitavelmente informação na criação dos vetores que unem os pontos, como é possível verificar na Figura 16 onde o objeto à esquerda é o que ainda não passou pelo processo de colocação dos vetores e o da direita a vermelho é o polígono criado e verifica-se que foi perdida informação original que está a verde (Tewkesbury, Comber, Tate, Lamb, & Fisher, 2015, pp. 5-6).

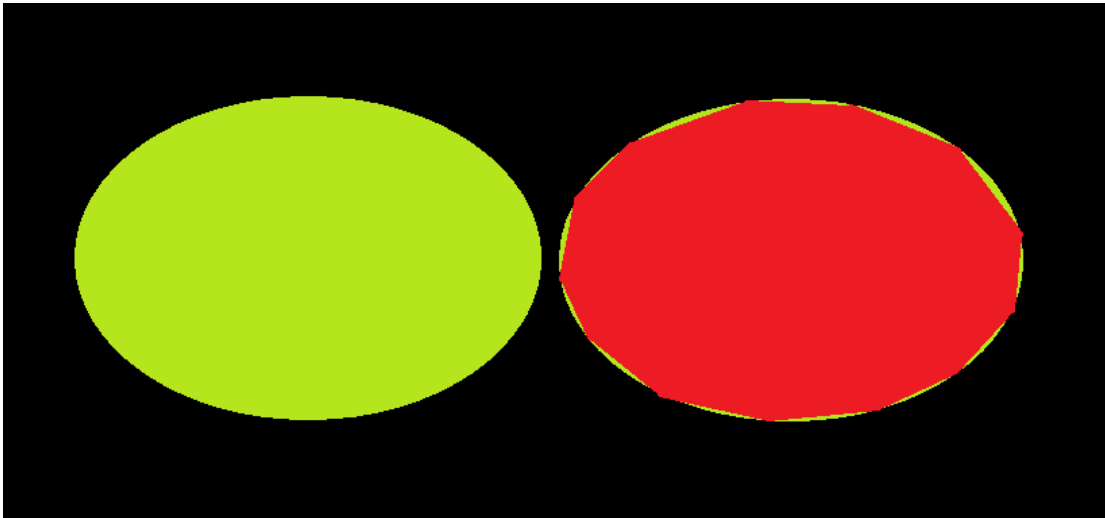


Figura 16: Exemplo da utilização de vetores poligonais

Fonte: (criação do próprio autor, 2023)

No entanto, neste estudo como se trata de aeronaves militares cuja pintura, por regra é de tipo camuflagem, esta técnica pode ser utilizada ao longo do avião todo para estudar a mudança no padrão das cores bem como a descoloração ao longo da vida útil da aeronave permitindo ficar a par do desgaste ocorrido na coloração do avião, tendo assim a prova da necessidade de de uma nova pintura.

A opção híbrida tem como base de funcionamento a possibilidade de utilizar um conjunto de outros itens de forma a poder obter os resultados pretendidos de forma eficaz. Na maioria dos casos os dois itens que são unidos são o pixel, ou seja, o estudo pixel a pixel comparando os valores de luminosidade e cor, seguido do uso do filtro de *Kernel*, o que permite obter valores mais exatos de alterações ocorridas no pixel central que é o pixel ao qual será atribuído o valor (cor e luminosidade) da média dos pixéis que o rodeiam que foi fornecida pela análise pixel a pixel.

Este pixel central é caracterizado por ser aquele que, se a imagem fosse composta por nove pixéis, é o pixel que se encontra na segunda linha e segunda coluna (Tewkesbury, Comber, Tate, Lamb, & Fisher, 2015, p. 6).

Apesar de na maioria dos casos serem utilizados estes itens, tal não impede a possibilidade de unir outros dois ou mais. Tendo em consideração o estudo do âmbito deste trabalho, a utilização do pixel em conjunto com a sobreposição dos objetos na imagem e o pixel com a comparação de objetos em imagens segmentadas, permite abranger a maior parte dos possíveis “*findings*”.

A primeira união irá permitir a identificação mais exata de alterações que afetem a cor, a textura e os padrões, enquanto na segunda junção tem-se a possibilidade da identificação de alterações da superfície que mudem a forma, a geometria e o tamanho, sendo então um processo com duas uniões abrangentes. Na Tabela 3 podem observar-se as vantagens, desvantagens e as alterações que cada item tem na capacidade de detetar. Na Figura 17 visualiza-se a utilização dos diferentes tipos de análise.

| Item de análise | Vantagens | Desvantagens | Alterações detetáveis |
|-------------------------|---|--|---|
| Pixel | Permite o estudo de alteração de cor e brilho | Não permite o estudo de alteração de tamanho e forma | Descoloração ou falta de tinta |
| Filtro de <i>Kernel</i> | Estudo de brilho e cor Filtragem de ruído | Pode haver perda de informação relativa a alterações Não é apta para o estudo de pequenas alterações | Descoloração, falta de tinta, corrosão em grandes áreas e falta de componentes de grandes dimensões |
| Sobreposição de objetos | Permite o estudo de variação de padrões e texturas | Não consegue detetar alterações de forma e tamanho Não permite a identificação de novos objetos que possam surgir | Distorções, falta de tinta, corrosão e erosão |
| Comparação de objetos | Permite identificar alterações de tamanho e geometria | Dificuldade no estudo de texturas | Falta de um componente, riscos, fissura, e distorções na superfície (indentações). |
| Polígonos Vetoriais | Identificar mudança de padrões, descoloração e estudo entre limites de placas | Possível perda de informação | Evolução de partes com corrosão e erosão |
| Multitemporal | Estudo da evolução de alterações ao longo de várias inspeções | Viável somente a longo prazo | Estudo da evolução de corrosão, perda de pintura ou descoloração |

Tabela 4: Resumo das vantagens, desvantagens dos itens de análise e respetivos exemplos das alterações que cada uma consegue suportar

Fonte: adaptado de: (Tewkesbury, Comber, Tate, Lamb, & Fisher, 2015, pp. 2-6); (Powell, 2023).

| | Image 1 | Change magnitude | Image 2 |
|-----------------------------|---------|------------------|---------|
| Pixel | | | |
| Kernel (moving window) | | | |
| Image-object overlay | | | |
| Image-object comparison | | | |
| Multi-temporal image-object | | | |
| Vector polygon | | | |
| Hybrid | | | |

Figura 17: Exemplos de uso para cada um dos itens de análise

Fonte: (Tewkesbury, Comber, Tate, Lamb, & Fisher, 2015, p. 4)

Na Figura 17, verifica-se que na imagem de referência (imagem 1), onde ainda não foi realizada nenhuma alteração no terreno, com os devidos passos de pré-processamento. A imagem retirada durante o processo de inspeção (imagem 2), foram efetuadas alterações na superfície

(p.e. como uma tenda branca sobre os objetos) em que também, foram realizados os passos de pré-processamento. Na imagem central (*change magnitude*) é possível verificar, em tons de cinza, as zonas onde foram detetadas alterações.

4.2.2 Técnicas de deteção de alterações na superfície

A técnicas de deteção de alterações em imagens de forma digital é um processo dinâmico e essencial em diversas indústrias, desde a medicina, a geografia, a aeronáutica, entre outras. Este processo de identificação de alterações é caracterizado pela observação de um objeto, que neste caso situa-se na superfície da aeronave, em duas datas diferentes e identificar que alterações ocorreram entre o período de cada levantamento de informação.

Neste contexto, esta parte do capítulo inclui informações sobre as principais técnicas usadas na deteção de alterações de forma digital em imagens, bem como oferecer uma compreensão da sua possível utilização neste projeto, o que inclui as vantagens e desvantagens, os desafios a ultrapassar em cada uma delas quando aplicado no contexto deste estudo. Nestas técnicas estão incluídos os métodos tradicionais, como a análise de diferenças e comparação direta de imagens, bem como técnicas de processamento mais avançadas que incluem “*machine learning*” e análise multitemporal¹.

Segundo Masroor Hussain, Chen, Cheng, Wei e Stanley (2013, pp. 91-92) existem duas categorias principais para a deteção de alterações de forma digital em imagens, o grupo que envolve as técnicas de deteção baseada nos píxeis e o outro grupo que engloba os métodos baseados nas diferenças dos objetos dentro de imagens. Não há que confundir estes grupos com os itens de análise referidos anteriormente já que estes itens podem ser usados em vários dos métodos a seguir descritos.

A diferença de imagens é relativamente simples de usar num algoritmo de deteção de alterações, pois esta técnica utiliza a operação básica da subtração entre píxeis correspondentes, em que os valores que subtrai são relativos à luminosidade e às alterações de cor. Sendo a subtração o foco desta técnica, a eficiência computacional é elevada comparativamente a outras técnicas, portanto tornando-a mais rápida, principalmente se antes do processamento, as imagens passarem por um redimensionamento e centralização (processo que permite que o pixel central de cada imagem seja o mesmo), tornando-as com a mesma resolução. Esta técnica consegue comparar diversos aspetos sendo possível obter diversos mapas que representam as alterações entre as duas imagens (Coppin, Jonckheere, Nackaerts, Muys, & Lambin, 2013, p. 1576).

No entanto, apesar de parecer uma técnica eficaz, apresenta uma grande sensibilidade a ruídos, tal como foi referido na apresentação dos itens de análise, que envolvem a variações de luminosidade e sombras, o que pode resultar em alterações falsas positivas, que ocorrem quando o programa alerta da existência de uma alteração que na realidade não se encontra na superfície. Em adição, a qualidade e o desalinhamento das imagens a serem examinadas pode afetar a

¹ Análise multitemporal é realizada ao longo de várias datas de retirada de informação que visa o estudo das alterações ocorridas num determinado espaço de tempo.

deteção de alterações. Caso o cenário a ser estudado seja de alta complexidade o algoritmo pode apresentar dificuldades na execução resultando possivelmente em resultados errados (Coppin, Jonckheere, Nackaerts, Muys, & Lambin, 2013, p. 1576).

Para o caso deste estudo, esta técnica pode ser utilizada para certas ocasiões, como por exemplo quando se pretende estudar alterações na pintura ou a evolução de certos tipos de corrosão que afetam uma área que o algoritmo possa ler.

Tendo em consideração as desvantagens apresentadas para esta técnica e tendo por base o equipamento principal deste projeto que é o drone, a precisão das imagens pode não ser a melhor quando comparada com as imagens de referência, podendo então verificar-se uma pequena alteração no ângulo de retirada das imagens, bem como pequenas variações da distância de retirada das fotografias à aeronave. Estes fatores podem então ocultar alterações na superfície ou apresentar falsos positivos.

Tal como a diferenciação das imagens por subtração existe também a técnica que envolve divisão denominada de racionamento de imagens. Tal como a diferença de imagens, esta técnica utiliza os valores de luminosidade e de cor de cada um dos pixéis correspondentes, fazendo então a divisão desses valores entre as duas imagens.

Apresenta as mesmas dificuldades e vantagens da diferenciação entre as imagens, acrescentando somente a possibilidade de apresentar os mapas finais em valores percentuais (Coppin, Jonckheere, Nackaerts, Muys, & Lambin, 2013, p. 1577).

A regressão de imagens utiliza um algoritmo complexo que usa em funções lineares que incluem o tempo e as coordenadas dos objetos e pixéis em estudo da imagem, que se baseia em modelos de regressão que usa dados estatísticos (base de dados de imagens de alterações retiradas ao longo do tempo) no processamento de imagem, onde os dados dos pixéis são estimados tanto a partir de dados de pixéis vizinhos como das propriedades gerais da imagem, o que permite corrigir possíveis ruídos e realizar interpolações em imagens (Chen, Cheng, Wei, Stanley, & Hussain, 2013, p. 96).

Esta técnica utiliza o *machine learning* utilizando a base de dados já criada, permitindo assim analisar padrões mais complexos e subtis do que técnicas que utilizam pixel a pixel, para o âmbito da aplicação onde este trabalho se enquadra a um nível logístico torna-se pouco prático tendo em consideração a dimensão da base de dados necessária para analisar cada uma das possíveis alterações da superfície que podem ocorrer numa aeronave.

A análise de vetor de mudança é outra técnica usada para a deteção das alterações da superfície. Esta baseia-se na criação de vetores do ponto inicial na imagem de referência até ao ponto final na imagem que se quer analisar, o que pode fornecer informações relativamente à mudança de forma, de textura, de cor e de tamanho da alteração. A “gravidade” da alteração é determinada a partir da magnitude dos vetores criados e fornece também a informação relativa à evolução da alteração a partir da direção e sentido dos vetores representantes de alterações (Tewkesbury, Comber, Tate, Lamb, & Fisher, 2015, pp. 8-9).

Tal como referido, uma das vantagens da utilização de vetores na análise da deteção de alterações é a possibilidade de examinar várias características como a cor, a textura, a forma e o tamanho que são as principais características de “*findings*” em superfícies aeronáuticas. Nalguns

destes *findings* a mudança é gradual, como a evolução da corrosão ou de um risco, que pode ser visível a partir deste método se forem guardadas e analisadas imagens de diferentes datas de inspeção da mesma alteração e obviamente local, algo que possivelmente seria de difícil percepção por parte do inspetor a olho nu.

No entanto, esta técnica exige uma complexidade computacional muito elevada, exigindo também uma base de dados precisa e de alta qualidade.

Existe também o fator da mudança repentina da superfície que para o caso de estudo de uma aeronave é visível em várias áreas da sua superfície como as mudanças de placas na casca, portas, janelas e superfícies de comando, que esta técnica tem dificuldade em interpretar (Tewkesbury, Comber, Tate, Lamb, & Fisher, 2015, pp. 8-9).

O “*machine learning*”, tratando-se de uma técnica de deteção de alterações da superfície, utilizaria dados anteriormente documentados e fotografados comparando-os com imagens de referência dos mesmos locais sem qualquer tipo de alteração de forma a aprender padrões e características que permitam ao algoritmo identificar mais facilmente novas alterações na superfície. Sendo assim, é necessária a recolha de pares de imagens, uma de referência e outra alterada, de seguida extrai-se as características das alterações passando então para o treino do modelo (Chen, Cheng, Wei, Stanley, & Hussain, 2013, p. 97).

Após feita a validação e avaliação através de conjunto de base de teste e que não foram utilizados durante a “aprendizagem” do algoritmo, o modelo encontra-se apto a identificar novas alterações em diferentes conjuntos de imagens, onde se pretende realizar estudos. Esta técnica apresenta então após um bom “treino” uma alta capacidade de aprender padrões extremamente complexos e subtis que o operador por si não conseguiria detetar, bem como teria a capacidade de deteção de alterações da superfície na sua fase inicial. Apresenta também a capacidade de lidar com as múltiplas alterações possíveis de uma superfície aeronáutica (Chen, Cheng, Wei, Stanley, & Hussain, 2013, p. 97).

Esta capacidade de lidar com uma vasta gama de alterações é a razão que obriga a que durante o processo de treino a base de dados necessária para que o algoritmo aprenda deve ser de alta complexidade, apresentando diversos exemplos dos mesmos *findings* em sítios diferentes e vice-versa onde no mesmo sítio podem ocorrer alterações diferentes, apresentado diversos exemplos da mesma situação, mas exposta de forma diferente. Sendo assim, apesar de ser teoricamente possível o uso desta técnica neste projeto torna-se muito complicada, tendo em consideração a quantidade de exemplos necessária para o “ensino” do programa.

No entanto, com o passar do tempo e com a documentação e registo fotográfico de diferentes alterações da superfície durante vários processos de inspeção, reunir-se-ia uma base de dados suficientemente grande para que o algoritmo consiga aprender de forma confiável e precisa todo o tipo de alterações possíveis nas estruturas de uma aeronave.

Passando então aos métodos que se baseiam em objetos dentro das imagens, é necessário a apresentação de uma metodologia que permita identificar os diferentes objetos dentro das diferentes imagens. Um exemplo destes métodos é o algoritmo *Faster R-CNN* que já foi utilizado em testes de imagens de referência fornecidas pela Aeromec e que foram capazes de identificar objetos dentro das imagens.

Segundo Ahmed Fawzy Gad (2023), este modelo de identificação *Faster R-CNN* tem duas partes principais, um módulo de geração de regiões propostas (RPN- *Region Proposal Network*) e um classificador que se baseia em redes neurais convolucionais (CNN-*Convolutional neural network*), que permitem delimitar e identificar o local dos objetos nas regiões de imagens propostas.

Primeiramente, a imagem passa por uma extração de características, sendo esta processada por uma CNN, que permite extrair características hierárquicas da mesma, sendo que estas características podem ser, nomeadamente, a forma do objeto, a sua textura e os seus limites. De seguida apresenta-se a RPN, sendo esta uma parte fundamental do processo *Faster R-CNN*, que gera dentro da imagem regiões de elevado interesse para objetos. Depois estas regiões propostas pelo RPN são submetidas a uma operação de “*pooling*” de forma que fiquem num tamanho que posteriormente seja possível o programa ler (Gad, 2023).

O passo seguinte é composto por duas partes, a saber, uma que identifica se existe na realidade um objeto na região definida e caso haja permite também fazer a sua classificação; e a outra parte faz um refinamento das fronteiras dos objetos já identificados alterando as coordenadas das mesmas dentro da imagem (a lógica usada para métodos que utilizam objetos é exemplificada na Figura 18).

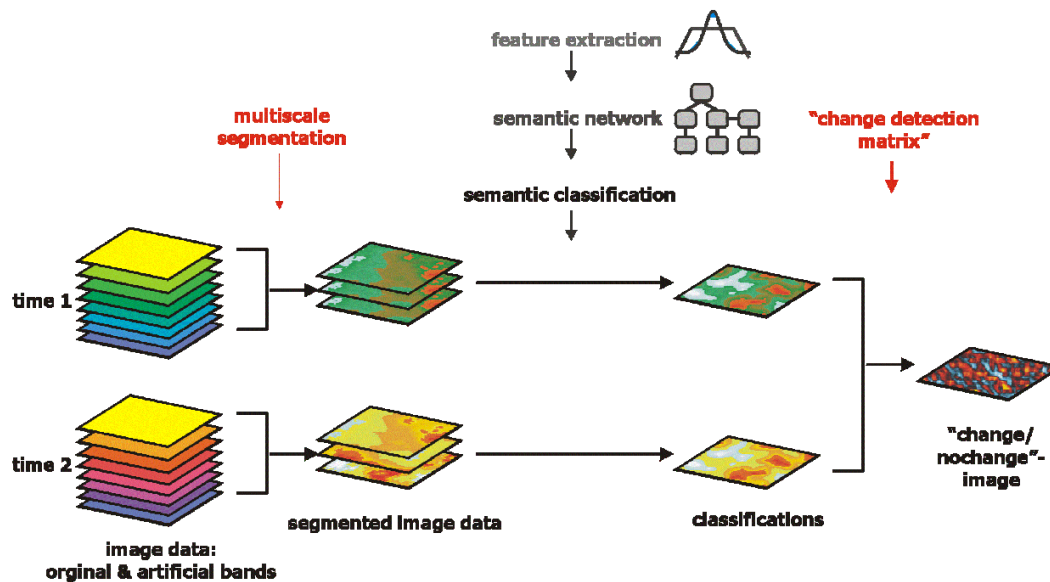


Figura 18: Processo de detecção de alterações para técnicas baseadas em objetos

Fonte: (Niemeyer & Canty, 2003, p. 5)

Este programa tem também uma componente de “*machine learning*” onde todas as fases são treinadas em simultâneo permitindo que o processo se torne mais eficaz em relação a precisão das previsões e das localizações dos objetos (Gad, 2023).

O método “*direct object change detection*” (detecção direta de mudanças de objetos) é uma técnica que recorre à identificação dos objetos dentro da imagem e à segmentação que permite identificar possíveis alterações que ocorreram entre imagens.

Esta técnica tem dois ramos; uma onde somente na imagem de referência são identificados e segmentados os objetos; e a outra onde as imagens dentro dos estudos são segmentadas e os objetos devidamente identificados.

A primeira opção não permite, no entanto, identificar possíveis objetos novos nas imagens retiradas durante o processo de inspeção, em contrapartida a segunda opção permite identificar novos objetos, já que a imagem retirada é também segmentada e são identificados todos os objetos dentro da imagem (Chen, Cheng, Wei, Stanley, & Hussain, 2013, p. 100).

Considerando, a segunda opção ambas as imagens são segmentadas, são extraídas também de ambas as imagens as características de cada um dos objetos como a forma, o tamanho, a sua cor e textura as quais são características de muitos dos “findings” mencionados, no respetivo capítulo.

De seguida, ocorre a comparação destas características em cada um dos objetos das imagens e, dependendo dos critérios estabelecidos, o algoritmo determina se existe ou não uma alteração significativa para alertar o inspetor.

Esta técnica permite então que o estudo de alterações da superfície seja focado em objetos específicos e não na imagem global, tornando-se útil no estudo das zonas em que existem, por exemplo, janelas, portas, rebites e até mesmo superfícies de controlo.

Sendo assim, esta permite detetar alterações em meios complexos onde existe uma vasta gama de objetos podendo estes ser estudados individualmente (Chen, Cheng, Wei, Stanley, & Hussain, 2013, p. 100).

Para que este método seja viável, a técnica de segmentação implementada deve ser precisa e confiável, as condições de retirada das imagens durante o processo de inspeção devem ser muito semelhantes àquelas usadas para obter as imagens de referência, nomeadamente, em relação à luminosidade e ruído.

Outra técnica que utiliza os objetos segmentados nas imagens é a “*Classified Objects change detection*” (Deteção de alterações em objetos classificados), a qual é muito semelhante à anterior.

Neste método já estão identificados e segmentados os objetos nas imagens de referência. Assim, são classificados quando à sua suposta cor, forma, tamanho e textura. Esta classificação pode ser feita através de “*machine learning*” ou manualmente pelo inspetor que identifica como os objetos devem permanecer (Chen, Cheng, Wei, Stanley, & Hussain, 2013, p. 100).

Portanto, as imagens que são retiradas durante o processo de inspeção também sofrem esta classificação e, após determinadas as características e as classificações de cada um dos objetos inseridos nas imagens, é feita a comparação destas classificações ao contrário da anterior onde as imagens eram “sobrepostas”.

As vantagens e desvantagens deste método são idênticas ao “*direct object change detection*”, com o acrescento que neste é possível a classificação da magnitude da alteração da superfície (Chen, Cheng, Wei, Stanley, & Hussain, 2013, p. 100).

Tem-se também o método denominado “*multidate-object change detection*”. Esta técnica permite avaliar a evolução ou as alterações de diferentes *findings* ao longo do tempo.

Esta técnica baseia-se na classificação de cada um dos *findings* durante os processos de inspeção da aeronave ao longo da sua vida útil, permitindo assim que o algoritmo e o próprio inspetor consigam prever o estado de cada um dos *findings* na próxima inspeção, através de padrões de evolução, determinando assim se é necessário ou não a intervenção de reparação ou a substituição das peças afetadas (Coppin, Jonckheere, Nackaerts, Muys, & Lambin, 2013, pp. 1580-1582).

Esta técnica tem como principal objetivo a monitorização dos *findings* que se encontram na superfície da aeronave que ainda estão dentro dos parâmetros aceitáveis, mas que a evolução necessita de ser monitorizada, pois a evolução de *findings* que afetem a integridade estrutural da aeronave, i.e., corrosão, fissuras ou erosão colocam a aeronave em risco de segurança.

Por fim, esta técnica híbrida apresenta uma abordagem inovadora que permite a integração e associação de diferentes métodos de identificação de alterações na superfície da aeronave. Esta metodologia ao combinar múltiplos métodos procura mitigar as limitações de cada abordagem individual, permitindo uma avaliação mais abrangente e precisa do estado da superfície da aeronave.

Esta sinergia entre métodos de identificação de alterações (como demonstra a Tabela 4), proporciona uma análise mais completa, onde as desvantagens dos métodos utilizados podem ser atenuadas pelas vantagens de outros, o que resulta numa estratégia de inspeção mais eficaz (Tewkesbury, Comber, Tate, Lamb, & Fisher, 2015, p. 7).

| Método | Vantagens | Desvantagens | Alterações Detetáveis |
|------------------------------------|--|---|--|
| Diferença de imagens por subtração | Eficiência computacional elevada, obtenção de mapas com magnitude relativamente a cor e luminosidade | Sensível a ruído e dependente da precisão das imagens | Cor e luminosidade/sombras |
| Diferença de imagens por divisão | Eficiência computacional elevada, obtenção de mapas com magnitude relativamente a cor e luminosidade | Sensível a ruído e dependente da precisão das imagens | Cor e luminosidade/sombras |
| Regressão de imagens | Capacidade de atenuar ruídos | Utilização de uma base de dados | Todas as alterações |
| Análise de vetor de mudança | Determina a gravidade da alteração relacionadas com | Complexidade computacional elevada, dificuldade de análise em | Corrosão, descoloração, erosão, indentações e distorções |

| | | | |
|--|--|---|--|
| | variações de cor, textura, forma e tamanho | mudanças repentinas de cenário | |
| <i>Direct object change detection</i> | Identificação de todos os objetos dentro da imagem, extração de características dos objetos como forma, tamanho, cor e textura, de pequena e grande escala, detecção de novas alterações que tenham ocorrido | Sensível a luminosidade e ruído | Corrosão, erosão, falta de componente ou parte, fissuras e indentações |
| <i>Classified objects change detection</i> | Permite a classificação das características dos objetos detetados e da magnitude da alteração da superfície | Determinação inicial das magnitudes dos <i>findings</i> já existentes | Corrosão, erosão, falta de componente ou parte, indentações e fissuras |
| <i>Multidate-object change detection</i> | Avaliação da evolução de alteração ao longo de várias inspeções | Somente viável a longo prazo | Alteração da cor, evolução da corrosão/erosão e da falta de tinta |

Tabela 5: Resumo das vantagens, desvantagens das metodologias de detecção de alterações e exemplos das alterações que cada uma consegue suportar

Fonte: adaptado de: (Chen, Cheng, Wei, Stanley, & Hussain, 2013, p. 100); (Coppin, Jonckheere, Nackaerts, Muys, & Lambin, 2013, pp. 1580-1582); (Tewkesbury, Comber, Tate, Lamb, & Fisher, 2015, p. 7).

4.2.3 Avaliação do processamento de imagem

A opção que se considera adequada no âmbito da avaliação de *findings* de aeronaves passa pela utilização de sistemas automáticos como apoio, todavia fica a cargo do inspetor a decisão final sobre as ações a tomar.

De igual modo, mesmo que estatisticamente se demonstre que, independentemente do método, exista elevada probabilidade de detetar *findings*, deverá ser o inspetor a ditar o resultado final.

Para isso, no processo de identificação de *findings* é fundamental não assumir que um processo deteta a 100% todas as alterações de superfície, pelo que o inspetor deve considerar como metodologia a verificação de todas as imagens resultantes da avaliação e dessa forma deduzir como a aeronave foi inspecionada e que nada ficou por identificar.

4.2.4 Resultados Obtidos

Sendo assim, o processo que é sugerido será tomar uma metodologia híbrida, pois é possível assim atenuar desvantagens de alguns dos métodos com as vantagens de outros. Estes métodos de identificação que foram referidos e que são a sugestão deste trabalho de revisão é a

diferença de pixels correspondentes, a comparação direta de objetos e a sobreposição de objetos dentro da imagem.

O pré processamento necessário para a análise das imagens para utilizar os métodos referidos são, portanto, o redimensionamento e a centralização para que seja possível existir a comparação direta de pixels e objetos, de forma a estarem nas mesmas coordenadas na imagem. Não existindo *a priori* uma necessidade da alteração de cor nas imagens já que as condições de obtenção das imagens de referência e das obtidas durante o processo de inspeção serão praticamente as mesmas, também tendo em consideração que algumas das alterações manifestam-se com alteração de cor, é possível que estas sejam suprimidas ao alterar a luminosidade ou a cor das imagens.

A segmentação para os métodos que utilizem os objetos para serem comparados que é o caso da comparação direta e a sobreposição, é um passo de pré processamento essencial, após efetuada a centralização e o redimensionamento.

A aplicação de um filtro para a redução de ruído é um passo de pré processamento, que poderá ser útil dependendo da qualidade de imagens que sejam obtidas e também da câmara que eventualmente será instalada no drone.

A utilização do método da diferença de pixels é uma técnica que irá permitir avaliar mudanças de cor e de luminosidade, podendo assim fornecer um mapa da imagem onde estas alterações foram mais atenuadas ou não, o que irá permitir ao inspetor avaliar áreas que foram sinalizadas pelo programa pelo facto da diferença, de cor e luminosidade, ser elevada em valor e área afetada.

O uso da sobreposição de objetos e comparação dos mesmos dentro da imagem irá permitir avaliar as mudanças de forma, tamanho, geometria e textura. Com a sobreposição é avaliada a textura e com a comparação direta de objetos é possível indicar alterações de forma, geometria e tamanho.

Sendo assim a junção destas técnicas irá então permitir ter um método que consiga abranger a maior parte das alterações da superfície que numa aeronave possam ocorrer.

A fase de avaliação final do processamento da imagem, que em outras áreas nas quais também utilizam processamento de imagens para deteção de alterações é realizada de forma automática, neste projeto esta avaliação será feita de forma manual, ou seja, quando o programa detetar uma alteração, o inspetor será responsável por determinar se existe ou não uma alteração significativa ao ponto de necessitar a intervenção de reparação ou mudança da peça em estudo.

Em suma, foi efetuado um fluxograma (Figura 19) com os passos, bem como os métodos utilizados em cada uma das fases do processamento de imagem, que considero os mais indicados para a deteção de forma automática das alterações numa superfície aeronáutica.

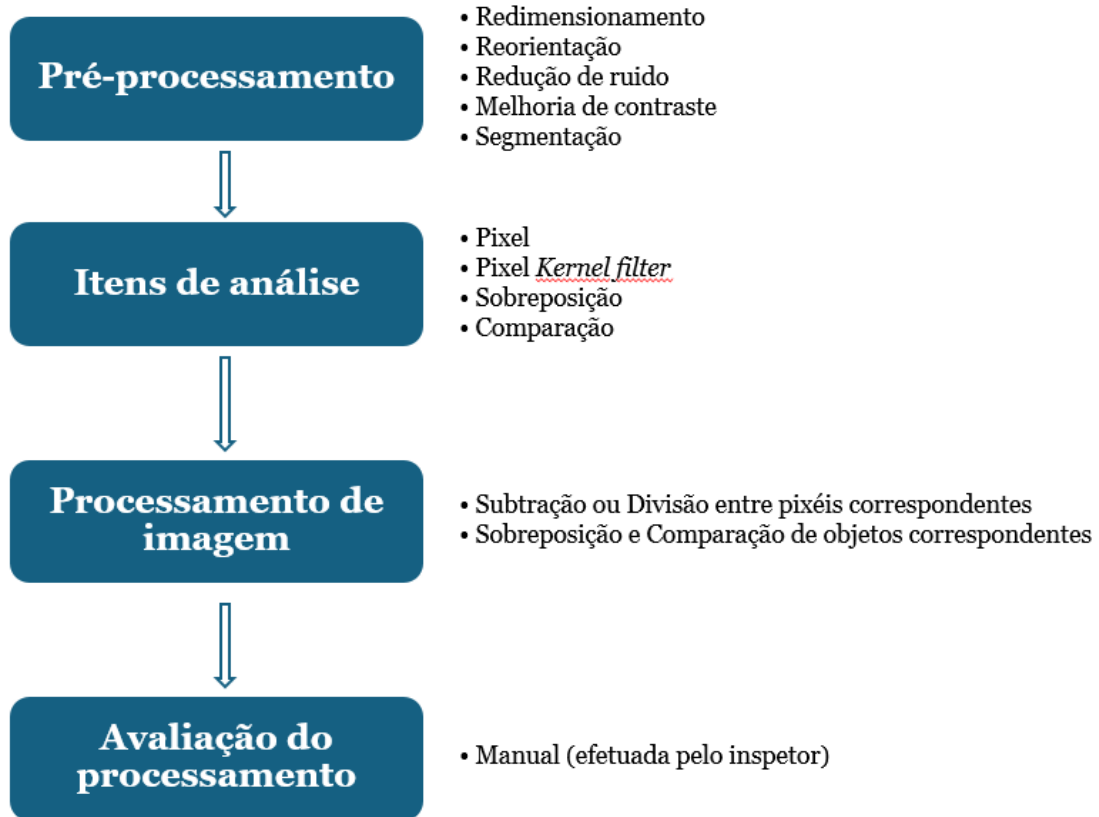


Figura 19: Fluxograma resumo das técnicas selecionadas

Fonte: (criação do próprio autor, 2023)

Capítulo 5 – Conclusão

Neste último capítulo, será realizado um resumo geral, destacando o que foi alcançado em relação aos objetivos estabelecidos e como esses objetivos foram abordados. Além disso, serão discutidas potenciais áreas para trabalhos futuros dentro do intuito deste projeto.

Relativamente ao objetivo principal deste estudo, que contempla a criação de uma metodologia para identificação de alterações da superfície de fuselagens recorrendo a processos de digitalização, através de um processo automático de avaliação da aeronave C130, foi possível fazer um levantamento do estado da arte dos conteúdos necessários para o atingir, nomeadamente as definições de manutenção em que o projeto se enquadra, descrições das estruturas, apresentando-se como o foco deste estudo, as alterações da superfície que se podem encontrar e as suas características físicas, bem como as metodologias de análise de imagem que permitem identificar alterações em imagens.

Relativamente às definições de manutenção foi possível enquadrar o projeto em manutenções de base programadas, mais em específico as inspeções que nestas decorrem, com o intuito de manter a aeronavegabilidade continuada da aeronave de estudo.

No que diz respeito às estruturas da aeronave, foram analisadas aquelas em que os inspetores têm dificuldade em aceder, nomeadamente a deriva, o extradorso da asa, e a parte superior da fuselagem, onde foi adotada um cota de 1.80 m na aeronave, para ser considerada de difícil acesso aos inspetores.

A partir do levantamento do estudo das alterações da superfície, verificaram-se então características físicas dos “*findings*” que serão úteis para a análise das imagens com vista a detetar alterações ocorridas dentro destas, sendo estas características físicas na cor, na textura, na geometria, na dimensão e na luminosidade

Em relação ao método de processamento de imagem que permitirá, no futuro, identificar alterações que ocorreram nas superfícies aeronáuticas, foram consideradas as vantagens, desvantagens, bem como as limitações de cada processo em cada um dos passos, chegando à conclusão de que a comparação por subtração e divisão de píxeis correspondentes, irá permitir um estudo nas variações de cor e luminosidade, e que a partir da sobreposição de objetos é possível o estudo da variação de textura na superfície, assim como a comparação direta de objetos dentro das imagens, permitirá, na mesma linha, obter variações na forma e dimensão dos objetos bem como identificar novos objetos que tenham surgido no processo de inspeção.

A longo prazo e com a devida documentação e registo de imagens, bem como a descrição das alterações encontradas durante os processos de inspeção programada, existirá a possibilidade de criar uma base de dados para implementar um programa que utilize o “*machine learning*” de forma a que seja possível determinar o tipo de alteração ou seja, indicar o *finding* e caracterizá-lo de forma automática, sem a necessidade de existirem imagens de referência para o estudo e avaliações posteriores da superfície da aeronave.

5.1 Trabalhos futuros

A continuação deste estudo começa pela criação de um código responsável pela implementação desta metodologia de processamento de imagem que vise a detecção de alterações da superfície. A criação deste programa poderá ter como objetivo a verificação da metodologia sugerida na conclusão.

Outra proposta envolve a possibilidade de testar numa situação real, com um drone próprio e com o *flight path* já definido para a aeronave do estudo e assim realizar testes no terreno de forma a obter resultados específicos bem como a avaliação destes resultados.

Por fim a proposta de trabalho que envolve o *machine learning* é a criação do programa responsável pela detecção e caracterização automática das alterações da superfície. Isto implica a pré-existência de uma base de dados que irá possibilitar que o trabalho seja realizado com êxito.

Referências

- Aero Corner. (2023). *6 Types of Aircraft Corrosion To Be Wary Of*. Obtido em nov2023, de Aero Corner: <https://aerocorner.com/blog/types-of-aircraft-corrosion/>
- Aeromec. (2023). *Comercial and business*. Obtido em set2023, de Aeromec: <https://www.aeromec.pt/commercial-business/>
- Aeromec. (2023a). *About us*. Obtido em set2023, de Aeromec : <https://www.aeromec.pt/about-us/>
- Aeromec. (2023b). *MRO Commercial and Business*. Obtido em set2023, de Aeromec: <https://www.aeromec.pt/commercial-business/>
- Aeromec. (2023c). *MRO Defense aviation*. Obtido em set2023, de Aeromec: <https://www.aeromec.pt/mro-defense/>
- Aeromec. (2023d). *MRO Helicopters*. Obtido em set2023, de Aeromec: <https://www.aeromec.pt/mro-helicopters/>
- Aeromec. (2023e). *Interior solutions*. Obtido em set2023, de Aeromec: <https://www.aeromec.pt/interiors-solutions-3/>
- Aeromec. (2023f). *Modifications and upgrades*. Obtido em set2023, de Aeromec: <https://www.aeromec.pt/modifications-and-upgrades/>
- Aeromec. (2023g). *Certifications and approvals*. Obtido em set2023, de Aeromec: <https://www.aeromec.pt/certifications-and-approvals/>
- Air Force. (2023). *C-130 Hercules*. Obtido em nov2023, de Air force: <https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/1555054/c-130-hercules/>
- Alexander, R. (2023). *Repairing Sheet Metal - Dealing with dents, scratches, cracks, and missing rivets*. Obtido em nov2023, de EAA: <https://www.eaa.org/aaa/aircraft-building/builderresources/while-youre-building/building-articles/metal/repairing-sheet-metal>
- American HandForge. (2023). *Exfoliation*. Obtido em nov2023, de American HandForge: <https://www.handforge.com/technology/exfoliation.html>
- AV&R. (2023). *Blade Erosion: A Nightmare for MRO Shops*. Obtido em nov2023, de AV&R Global: <https://avr-global.com/technical-articles/blade-erosion-nightmare-mro-shops/>
- Aviation Manuals. (2023). *Mel Guide*. Rockville, Maryland: Aviation Manuals. Obtido de https://aviationmanuals.com/wp-content/uploads/2023/04/AviationManuals_MEL_Guide_2023.pdf
- Avitas. (2023). *Avitas technical terms*. Obtido em out2023, de Online Avitas: <https://online.avitas.com/techterms.jsp>
- Baesystems. (2023). *What is aircraft maintenance*. Obtido em oct2023, de Baesystems: <https://www.baesystems.com/en-us/definition/what-is-aircraft-maintenance>

- CFINotebook. (2023). *Aircraft Components & Structure*. Obtido em nov2023, de CFINotebook: <https://www.cfinotebook.net/notebook/aerodynamics-and-performance/aircraft-components-and-structure>
- Chen, D., Cheng, A., Wei, H., Stanley, D., & Hussain, M. (2013). Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 91-106.
- Comissão Europeia. (2014). *Jornal Oficial da União Europeia L362*, 1-194.
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., & Lambin, E. (2013). Review Article Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 1565–1596. doi:10.1080/0143116031000101675
- Cordero, J. (2023). *Leaks in aircraft*. Obtido em nov2023, de AERTEC: <https://aertecsolutions.com/en/2017/12/12/leaks-in-aircraft/>
- Cranfield University. (2023a). *Aircraft Maintenance*. Obtido em out2023, de Skybrary: <https://skybrary.aero/articles/aircraft-maintenance>
- Cranfield University. (2023b). *Continuing Airworthiness*. Obtido em out2023, de Skybrary: <https://skybrary.aero/articles/continuing-airworthiness>
- Cranfield University. (2023c). *Airworthiness*. Obtido em oct2023, de Skybrary: <https://skybrary.aero/articles/airworthiness>
- CVE. (2023). *About us*. Obtido em set2023, de Cabo Verde Express: <https://www.caboverdeexpress.com/>
- Czaban, M. (2018). Aircraft corrosion – review of corrosion. fatigue of aircraft structures. *FATIGUE OF AIRCRAFT STRUCTURES*, pp. 5-20.
- Dhital, D. (2023). *Aircraft Inspection Drone*. Obtido em nov2023, de Aviation Outlook: <https://aviationoutlook.com/aircraft-inspection-drone/>
- EASA Part-145 AMC145.A.10. (2016). *Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM) to Annex II (PART-145) to Commission Regulation (EU)*. EASA.
- Flugzeuginfo. (2023). *Lockheed / Lockheed Martin C-130 Hercules / L-100*. Obtido em out2023, de flugzeuginfo: https://www.flugzeuginfo.net/acdata_php/acdata_c130_en.php
- Fly White. (2023). *About Us*. Obtido em out2023, de Fly White-About Us: <https://www.flywhite.com/>
- Força Aérea. (2023a). *LOCKHEED C-130 H / H-30 HERCULES*. Obtido em nov2023a, de Força Aérea: <https://www.emfa.pt/aeronave-2-lockheed-c130-h-h30-hercules#>
- Força Aérea. (2023b). *Esquadra 501 – "Bisontes"*. Obtido em nov2023, de Força Aérea: <https://www.emfa.pt/esquadra-42-esquadra-501-bisontes>
- Gad, A. F. (2023). *Faster R-CNN Explained for Object Detection Tasks*. Obtido em nov2023, de PaperSpace: <https://blog.paperspace.com/faster-r-cnn-explained-object-detection/>
- Government Australian, C. A. S. A. (2023). *Requirements for Approved Maintenance Organisations (Part 145)*. Obtido em nov2023, de Civil Aviation Safety Authority: <https://www.casa.gov.au/aircraft/airworthiness/maintenance-organisations/requirements-approved-maintenance-organisations-part-145#Demonstratingyourcapabilities>

- Great Learning Team. (2023). *Introduction to Image Pre-processing | What is Image Pre-processing?* Obtido em nov2023, de Great Learning: <https://www.mygreatlearning.com/blog/introduction-to-image-pre-processing/>
- Kinnison, H., & “Terry” Siddiqui, T. (2013). *Aviation Maintenance Management*. New York: McGraw Hill.
- Krig, S. (2014). *Computer Vision Metrics Survey, Taxonomy, and Analysis*. Apress open. doi:10.1007/978-1-4302-5930-5
- Lafiosca, P., Fan, I.-S., & Avdelidis, N. (2023). Aircraft Skin Inspections: Towards a New Model for Dent Evaluation. *The British Institute of Non-Destructive Testing*, 1-20.
- Lim. (2023). *What happens if a plane window shatters mid-flight?* Obtido em nov2023, de Ask Captain Lim: <https://askcaptainlim.com/what-happens-if-a-plane-window-shatters-mid-flight/>
- Nelson, J. (2023). *What is Image Preprocessing and Augmentation?* Obtido em nov2023, de Roboflow: <https://blog.roboflow.com/why-preprocess-augment/>
- Niemeyer, I., & Canty, M. J. (2003). Pixel-based and object-oriented change detection analysis using high-resolution imagery. pp. 1-6.
- OATC. (2023). *Omni Aviation Training Center*. Obtido em set2023, de OATC: <https://www.oatc.pt/>
- OHI. (2023). *Omni Helicopters International*. Obtido em set2023, de OHI: <https://www.ohi.pt/>
- OMNI. (2023). *Omni Aviation Group*. Obtido em set2023, de OMNI: <https://www.omni.pt/>
- Omni Executive Aviation. (2023). *Omni Executive Aviation*. Obtido em out2023, de Omni Aviation: <https://www.omniaviation.pt/>
- One Monroe Aerospace. (2022). *The Importance of Airplane Paint*. Obtido em nov2023, de Monroe Aerospace: <https://monroeaerospace.com/blog/the-importance-of-airplane-paint/>
- Powell, V. (2023). *Image Kernels*. Obtido em nov2023, de Setosa: <https://setosa.io/ev/image-kernels/>
- Rowbotham, J. (2023). *Erosion Protection of Aircraft Radomes and Leading Edges - Protect Your Asset and Your Image*. Obtido em nov2023, de Linked In: <https://www.linkedin.com/pulse/erosion-protection-aircraft-radomes-leading-edges-your-rowbotham>
- Saranga, D. (2023). *Lockheed C-130H Hercules*. Obtido em out2023, de The-blueprints: https://www.the-blueprints.com/blueprints/modernplanes/lockheed/81224/view/lockheed_c-130h_hercules/
- Shukka Methods. (dez de 2023). *GIS and Remote Sensing-Change Detection*. Obtido em dez 2023, de Shukka Methods: <https://shukka.com/change-detection-services.php>
- Skybrary. (2023a). *Approved Maintenance Organization (AMO)*. Obtido em out2023, de Skybrary: <https://skybrary.aero/articles/approved-maintenance-organization-amo>

- State Compensation Insurance Fund. (2023). *Aircraft Maintenance Safety*. Obtido em nov2023, de Safe At Work California: <https://www.safeatworkca.com/safety-articles/aircraft-maintenance-safety/>
- Tavares, J. M. (2010). Processamento e Análise de Imagem: Métodos e Aplicações. Obtido em nov2023, de https://web.fe.up.pt/~tavares/downloads/publications/comunicacoes/Presentation_CONEM2010_JT.pdf
- Tewkesbury, A. P., Comber, A. J., Tate, N. J., Lamb, A., & Fisher, P. F. (2015). A critical synthesis of remotely sensed optical image change. *Remote Sensing of Environment*, 1-12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.01.006>
- The Editors of Encyclopædia Britannica. (2023a). *Fuselage*. Obtido em nov2023a, de Britannica: <https://www.britannica.com/technology/fuselage>
- The Editors of Encyclopædia Britannica. (2023b). *Wing Aircraft*. Obtido em nov2023, de Britannica: <https://www.britannica.com/technology/wing-aircraft>
- Tye, W. (1945). Airworthiness of civil aeroplanes. *The Royal Aeronautical Society*, 353-360.
- Universidad Europea. (2023). *What is aircraft maintenance*. Obtido em out2023, de Universidad Europea: <https://universidadeuropea.com/en/blog/what-is-aircraft-maintenance/>
- WDMMA. (2023). *Portuguese Air Force*. Obtido em out2023, de World Directory of Modern Military Aircraft: <https://www.wdmma.org/portuguese-air-force.php>
- Yaang. (2022). *Pitting of steel*. Obtido em fev2024, de Yaang: <https://www.yaang.com/pitting-of-steel.html>