

ATLÂNTICA – Instituto Universitário

**Manutenção em trens de aterragem:
Análise de acidentes e incidentes**

Miguel Alexandre Marques Rodrigues

Dissertação para a obtenção de grau de Mestre em Gestão e
Tecnologia de Manutenção Aeronáutica

Dissertação orientada pelo Professor Doutor Rui de Carvalho

Outubro, 2022

ATLÂNTICA – Instituto Universitário

**Manutenção em trens de aterragem:
Análise de acidentes e incidentes**

Miguel Alexandre Marques Rodrigues

Dissertação para a obtenção de grau de Mestre em Gestão e
Tecnologia de Manutenção Aeronáutica

Dissertação orientada pelo Professor Doutor Rui de Carvalho

Outubro, 2022

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer ao núcleo de Professores do Mestrado em Gestão e Tecnologia de Manutenção Aeronáutica, da Atlântica – Instituto Universitário, pela excelência do ensino, fator determinante que proporcionou a realização desta dissertação.

Um agradecimento especial ao meu orientador, o Professor Doutor Rui de Carvalho, pelas suas sugestões e instruções metodológicas, pelo esclarecimento de questões que surgiram no decorrer deste projeto, pela partilha de conhecimentos e acima de tudo pela pronta disponibilidade que sempre demonstrou, contributos fundamentais para o sucesso do mesmo.

Um agradecimento ao Professor Doutor Manuel Freitas, pelas estimadas sugestões quanto à definição da temática e encaminhamento da dissertação.

Um agradecimento especial à minha Mãe, ao meu Pai, à minha Irmã e aos meus Avós, pelo apoio, paciência e dedicação para que eu possa investir na minha formação académica.

À minha namorada Filipa Reis, um agradecimento cheio de carinho pelo apoio, paciência, encorajamento, motivação e por caminhar ao meu lado, tanto nos melhores momentos como nos mais difíceis.

Por último, um agradecimento aos meus amigos, em particular à Manuela Gaspar, pelas suas sugestões e revisão do texto e colegas de curso, pela partilha de conhecimentos e experiências.

Resumo

O trem de aterragem constitui um dos sistemas mais importantes de uma aeronave, apresentando um papel fundamental na sua operação. Apesar de, por norma, não estar associado a acidentes fatais, apresenta-se como um dos sistemas com maior índice de ocorrências. A manutenção aeronáutica, por sua vez, tem um papel decisivo na segurança da operação aérea, constituindo assim um fator determinante para a condição de aeronavegabilidade da aeronave.

Esta dissertação tem como finalidade a análise de acidentes e incidentes, resultantes de falhas nos trens de aterragem de aeronaves a motor complexas, ocorridos devido a ações de manutenção com o objetivo de apurar as principais falhas neste setor e formular uma proposta que vise a promoção da segurança aeronáutica.

Foram abordadas algumas temáticas consideradas importantes para o enquadramento do tema. Apresenta-se a constituição do trem de aterragem de uma aeronave a motor complexa, e abordam-se as suas diferentes configurações e componentes. Realiza-se o estudo de casos reais e o tratamento dos dados obtidos. Constata-se que a falha no cumprimento de procedimentos de manutenção é uma das principais causas das ocorrências analisadas e apresenta-se uma proposta de mitigação da falha identificada, com recurso às novas tecnologias de informação. Abordam-se os temas da aeronavegabilidade e da manutenção aeronáutica, sendo desenvolvidos diversos conceitos e definições importantes no contexto desses mesmos temas. As tecnologias de informação, bem como a evolução da revolução industrial, dão início à secção seguinte, abrindo caminho para o tema da realidade aumentada que constitui o fundamento da proposta de intervenção, apresentada no âmbito da formação dos técnicos de manutenção aeronáutica.

Palavras-Chave

Manutenção, trem de aterragem, aeronave, acidente.

Abstract

The landing gear is one of the most important systems of an aircraft, displaying a central role in its operation. While not generally being related to fatal accidents, it is one of the systems with a higher rate of occurrences. Aircraft maintenance has a decisive role in the safety of the airborne operation, hence being a determinant factor for the aircraft's airworthiness.

The first objective of the present dissertation is to analyze accidents and incidents resulting from failures on the landing gears of complex motor-powered aircrafts, occurred due to maintenance actions with the aim of ascertaining the major failures. The second objective is to formulate a proposal envisaging the promotion of aviation safety.

With this purpose in mind, various topics were approached for the subject's framework. In the first place, this work presents the formation of a landing gear of a complex motor-powered aircraft, broaching its different configurations and components. Secondly, empirical based case studies and data processing are conducted. As per the conclusion, compliance with maintenance procedures is one of the main causes for the occurrences under study. For this reason, the focus of the proposal is to present a mitigation measure for the above-mentioned cause by resorting to new information technologies.

Airworthiness and aircraft maintenance are discussed thereafter, developing diverse concepts and definitions supporting the proposal. Information technologies and the evolution of the industrial revolution launch the ensuing section, paving the way for the augmented reality theme, the core of the intervention proposal submitted, within the framework of aeronautical technicians training.

Keywords

Maintenance, landing-gear, aircraft, accident.

Índice

Agradecimentos	3
Resumo	4
Abstract.....	5
Índice de Tabelas	9
Índice de Figuras.....	10
Lista de Abreviaturas	11
1. Introdução	14
1.1. Motivação.....	14
1.2. Objetivos	14
1.3. Âmbito.....	14
1.4. Estrutura da dissertação.....	15
2. Trem de aterragem	16
2.1. Introdução	16
2.2. Tipos de trens de aterragem	17
2.3. Disposição do trem de aterragem	17
2.4. Configuração do trem principal	19
2.5. Constituição de trens de aterragem em aeronaves a motor complexas.....	19
3. Estudo de casos reais	30
3.1. Introdução	30
3.2. O modelo teórico de <i>James Reason</i>	30
3.3. Visão geral sobre acidentes e incidentes causados por ações de manutenção nos LG.....	33
3.4. Análise de acidentes e/ou incidentes no sistema do trem de aterragem.....	37

3.5.	Análise estatística dos casos reais	49
4.	Aeronavegabilidade	51
4.1.	Visão geral do conceito de aeronavegabilidade	51
4.2.	Aeronavegabilidade permanente	55
4.3.	CAMO – Entidade de gestão da aeronavegabilidade permanente	55
4.4.	Entidades regulamentadoras.....	57
4.4.1.	Internacional Civil Aviation Organization (ICAO)	57
4.4.2.	The European Authority for Aviation Safety (EASA)	57
4.4.3.	Autoridade Nacional da Aviação Civil (ANAC).....	58
5.	Manutenção aeronáutica	59
5.1.	Conceitos e definições.....	59
5.2.	Métodos de manutenção.....	61
5.2.1.	Manutenção corretiva	62
5.2.2.	Manutenção preventiva.....	63
5.2.2.1.	Manutenção preventiva sistemática	63
5.2.2.2.	Manutenção preventiva condicionada.....	65
5.2.2.3.	Manutenção preditiva.....	67
5.2.2.4.	Condition monitoring	68
5.3.	Operações de manutenção.....	70
5.4.	Programas de manutenção.....	72
5.4.1.	Nota histórica.....	72
5.4.1.1.	MSG-1.....	73
5.4.1.2.	MSG-2.....	73
5.4.1.3.	MSG-3.....	73
5.4.2.	Programa de manutenção da aeronave (PMA)	74

6.	Tecnologias de informação na manutenção aeronáutica	76
6.1.	A revolução industrial	76
6.2.	Indústria 4.0.....	77
6.2.1.	Tecnologias de informação	77
6.3.	Realidade mista	81
6.4.	Realidade aumentada	82
6.4.1.	Nota histórica.....	82
6.4.2.	Definição.....	82
6.4.3.	Classificações.....	82
6.4.4.	Sistema de RA	83
6.4.5.	Campos de aplicação	86
6.4.6.	Benefícios e limitações	88
7.	Proposta de intervenção	90
7.1.	Proposta de formação – Realidade aumentada.....	92
8.	Conclusão e trabalhos futuros.....	96
8.1.	Conclusão.....	96
8.2.	Trabalhos futuros	98
	Bibliografia	99
	Anexo 1.....	108

Índice de Tabelas

Tabela 1. Acidentes – Origem por sistema e tipo de operação aérea	34
Tabela 2. Incidentes – Origem por sistema e tipo de operação aérea.....	34
Tabela 3. Acidentes com origem nos LG e sistemas hidráulicos – Principais causas...	35
Tabela 4. Acidentes com origem nos LG e sistemas hidráulicos – Principais causas...	35
Tabela 5. Tabela resumo de análise de casos reais em função do fator causal associado à ocorrência	49
Tabela 6. Exemplo de tarefas de manutenção com diferentes periodicidades nos LG..	65
Tabela 7. Operações de Manutenção – Abreviaturas	70
Tabela 8. Sistema de classificação TAPES	91
Tabela 9. Análise dos impactos da implementação de novas tecnologias e técnicas de manutenção.....	93

Índice de Figuras

Fig. 1.	Configuração convencional do trem de aterragem	18
Fig. 2.	Configuração em triciclo do trem de aterragem	18
Fig. 3.	Configuração do rodado do MLG.....	19
Fig. 4.	Estrutura do trem principal	21
Fig. 5.	Amortecedor óleo-pneumático.....	22
Fig. 6.	Bloco de travões de disco múltiplo.....	27
Fig. 7.	Modelo Teórico de James Reason	32
Fig. 8.	Modelo do Queijo Suíço	33
Fig. 9.	Vista em corte do veio do tirante de torção superior e inferior do NLG	39
Fig. 10.	Demonstração da correta e incorreta montagem da anilha espaçadora.....	39
Fig. 11.	Demonstração da influência na incorreta montagem da anilha espaçadora.	40
Fig. 12.	Vista geral do trem de aterragem Boeing B737-300.....	42
Fig. 13.	Sub-tarefa nº32-11-00-034-169 – Boeing.....	42
Fig. 14.	Sistema de retração e extensão do NLG.....	47
Fig. 15.	Manutenção - Visão geral	62
Fig. 16.	Exemplos de funções densidade de probabilidade de falha	67
Fig. 17.	Aplicação da Manutenção Preditiva relativamente ao desgaste do equipamento	68
Fig. 18.	As cinco fases da Revolução Industrial.....	77
Fig. 19.	As nove tecnologias digitais que suportam a Indústria 4.0	80
Fig. 20.	Realidade Mista, Realidade Aumentada e Realidade Virtual	81
Fig. 21.	Exemplos dos métodos de rastreamento	84
Fig. 22.	Capacete com visão ótica direta	85
Fig. 23.	Percentagem de dispositivos de visualização de RA em aplicações industriais... ..	85

Lista de Abreviaturas

AD	<i>Airworthiness Directive</i>
AMM	<i>Aircraft Maintenance Manual</i>
ANAC	Autoridade Nacional da Aviação Civil
AOG	<i>Aircraft on Ground</i>
APU	<i>Auxiliary Power Unit</i>
ASRS	<i>Aviation Safety Reporting System</i>
ATA	<i>Air Transport Association of America</i>
ATC	<i>Air Traffic Control</i>
BDA	<i>Big data analytics</i>
BEA	<i>Bureau d'Enquêtes et d'Analyses pour la Sécurité de l'Aviation Civile</i>
CAD	<i>Computer-aided design</i>
CAMO	<i>Continuing airworthiness management organisation</i>
CAO	<i>Combined airworthiness organisation</i>
COA	Certificado de Operador Aéreo
CofA	Certificado de Aeronavegabilidade
DAH	Titular da aprovação de projeto
DCD	Abate
DDI	<i>Deferred Defect Items</i>
DOA	<i>Design Organisation Approval</i>
EASA	<i>The European Authority for Aviation Safety</i>
EUA	Estados Unidos da América
EPI's	Equipamentos de proteção individual
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>

FC	Verificação Funcional
FFP	<i>Failure to Follow Procedures</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GVC	Inspeção Visual
HMD	<i>Head-mounted display</i>
i4.0	Indústria 4.0
IA	Inteligência Artificial
IATA	<i>International Air Transport Association</i>
ICAO	<i>International Civil Aviation Organisation</i>
INS	Inspeção
IoT	<i>Internet of things</i>
LG	<i>Landing Gear</i>
LL	<i>Life limit</i>
LU	Lubrificação
MAREP	<i>Maintenance report</i>
MEL	<i>Minimum Equipment List</i>
MLG	<i>Main Landing Gear</i>
MPD	<i>Maintenance Planning Document</i>
MRBR	<i>Maintenance Review Board Report</i>
MTBF	<i>Mean time between failure</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDT	Ensaio Não Destrutivo
NLG	<i>Nose Landing Gear</i>
NTSB	<i>National Transportation Safety Board</i>

OIT	<i>Operators Information Transmission</i>
OJT	<i>On-the-job training</i>
OPC	Verificação Operacional
OVH	Revisão geral
P/N	<i>Part number</i>
PIREP	<i>Pilot report</i>
PMA	Programa de manutenção da aeronave
PTU	<i>Power Transfer Unit</i>
RA	Realidade Aumentada
RCM	<i>Reliability - Centered Maintenance</i>
RM	Realidade Mista
RV	Realidade Virtual
RST	Restauro
SB	<i>Service Bulletin</i>
SCM	<i>Swiss Cheese Model</i>
SRM	<i>Structural Repair Manual</i>
SVC	Revisão
S/N	<i>Serial number</i>
TI	Tecnologia de informação
TMA	Técnico de Manutenção de Aeronaves
UE	União Europeia
WAC	<i>Walk Around Check</i>
3D	Tridimensional

1. Introdução

1.1. Motivação

Os *Landing Gears* (LG) são sistemas robustos e complexos, que executam uma função crucial no desempenho das aeronaves. Estão sujeitos a diversos desafios, tais como a necessidade de ter uma relação peso volume mínimos, elevado desempenho e ciclo de vida útil, exigência mínima de manutenção e uma regulamentação rigorosa a nível de segurança.

A indústria aeronáutica, à semelhança de muitas outras regulamentadas por procedimentos de carácter obrigatório, encontra-se inevitavelmente exposta à falha no cumprimento de procedimentos ou instruções de trabalho. Assim, a principal motivação deste trabalho resulta da perspectiva da promoção da segurança aeronáutica no âmbito dos procedimentos de manutenção.

1.2. Objetivos

O objetivo desta dissertação é realizar um estudo de casos reais de acidentes e incidentes resultantes de falhas nos LG, com vista a analisar as principais causas das ocorrências originadas pela manutenção deste sistema da aeronave. Posto isto, pretende-se apresentar uma proposta de mitigação das falhas de manutenção com recurso às novas tecnologias de informação.

1.3. Âmbito

No âmbito desta dissertação pretende-se abordar os LG de aeronaves a motor complexas¹, concebidas para a descolagem e aterragem em pistas ou terrenos com superfícies preparadas. Deste modo, o foco deste trabalho irá incidir sobre as aeronaves utilizadas em operações de transporte aéreo comercial.

¹ Um avião:

- Com uma massa máxima à descolagem superior a 5 700 kg, ou certificado para uma configuração máxima superior a dezanove lugares, ou certificado para funcionar com uma tripulação mínima de dois pilotos, ou equipado com (um) motor(es) turbo-jacto(s) ou mais do que um motor turbohélice;

Um helicóptero certificado:

- Para uma massa máxima à descolagem superior a 3 175 kg, ou para uma configuração máxima superior a nove lugares, ou para funcionar com uma tripulação mínima de dois pilotos;

Uma aeronave de rotor orientável [84].

1.4. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em 8 capítulos que apresentam o trabalho desenvolvido. Neste primeiro capítulo é feita uma introdução ao tema da dissertação, apresentada a motivação para a sua escolha e definido o seu objetivo e âmbito.

No capítulo 2 é realizada uma descrição detalhada do trem de aterragem, das suas características, dos diferentes tipos e configurações existentes, bem como da sua constituição.

No capítulo 3 é salientada a importância da investigação dos acidentes de aviação, sendo abordado o modelo teórico do professor *James Reason* e mencionado o panorama geral das ocorrências cuja causa tenha sido a falha na manutenção nos LG. Este capítulo conclui-se com a realização de um estudo de casos reais que envolveram ações de manutenção nos trens de aterragem e com uma análise crítica dos dados recolhidos.

No capítulo 4 procede-se à abordagem do tema da aeronavegabilidade, à definição da entidade responsável pela sua gestão e das autoridades competentes que legislam o setor aeronáutico a nível nacional.

O capítulo 5, dedicado à manutenção, inicia com a apresentação dos conceitos e definições, assim como com os diferentes métodos e operações de manutenção existentes. De seguida passa-se para o contexto aeronáutico com uma breve nota histórica acerca dos programas de manutenção e finaliza-se com a análise do documento fundamental para a aeronavegabilidade da aeronave – Programa de Manutenção da Aeronave.

No capítulo 6 são expostas as novas tecnologias de informação da Indústria 4.0 (i4.0), nomeadamente a realidade aumentada (RA), a tecnologia destacada neste trabalho. É feita a descrição da sua definição e classificações, da constituição de um sistema de RA e dos seus campos de aplicação, bem como os seus benefícios e limitações.

No capítulo 7 é apresentada a proposta de intervenção em função das conclusões do estudo de casos reais efetuado no capítulo 3, com o propósito de mitigar as causas das ocorrências estudadas.

Por fim, no oitavo e último capítulo, é realizada a conclusão do trabalho, seguida de sugestões para trabalhos futuros.

2. Trem de aterragem

2.1. Introdução

O LG corresponde ao sistema que permite suportar a aeronave durante as operações no solo, nomeadamente no caminho de circulação (*taxiway*), nas descolagens e aterragens. O seu objetivo é absorver e dissipar a energia mecânica do impacto durante a aterragem, reduzindo a transmissibilidade das vibrações à fuselagem, proporcionar um meio de desaceleração e assegurar a separação entre a aeronave e o solo, permitindo o acionamento dos *flaps*, disponibilizando espaço para os motores instalados sob as asas e facilitando as manobras de carga e descarga.

O LG é composto por um *Main Landing Gear* (MLG), que suporta cerca de 90% do peso da aeronave e que é geralmente composto por vários conjuntos e por um trem auxiliar – *Nose Landing Gear* (NLG) [1].

No que diz respeito a esforços mecânicos, é um sistema sujeito essencialmente a elevadas forças de impacto, devido à energia mecânica do sistema durante as aterragens, mas também a forças horizontais exercidas nos momentos de travagem, de aceleração e de reboque das aeronaves. Relativamente às condições de operação, este sistema é submetido às intempéries, sendo comum a sua operação sob grandes amplitudes térmicas, ambientes corrosivos e contaminantes, como partículas de poeiras e areia.

Os LG são sistemas complexos que podem assumir diferentes tipologias e configurações, dependendo do tipo e modelo da aeronave e da operação de voo. Neste capítulo será feita a sua análise, assim como dos principais sistemas que os constituem.

2.2. Tipos de trens de aterragem

Existem dois tipos de trens de aterragem: trens de aterragem fixos e trens de aterragem retráteis.

Os LG fixos encontram-se numa posição fixa, o que se traduz num aumento do coeficiente aerodinâmico (C_d) e, por conseguinte, num aumento da força de arrasto da aeronave, provocando uma redução da *performance*. Este sistema é normalmente encontrado em aeronaves de baixa velocidade, ou cuja simplicidade seja um fator importante a ter em conta [1].

Os LG retráteis encontram-se parcialmente ou totalmente no interior da estrutura da aeronave, com vista a reduzir a força de arrasto e otimizar a sua aerodinâmica. Após a descolagem o trem é recolhido e armazenado na asa e fuselagem, sendo apenas acionado na aproximação final à pista de aterragem. Dada a complexidade deste tipo de LG as necessidades de manutenção são superiores face aos LG fixos [1].

2.3. Disposição do trem de aterragem

No que toca à disposição do LG na aeronave, existem duas classificações comuns: disposição convencional e em triciclo.

A configuração convencional, ilustrada na Figura 1, consiste num trem principal localizado perto do centro de gravidade da aeronave e numa roda traseira perto da cauda. Esta configuração está associada a aeronaves projetadas para operações de solo com pisos irregulares, possuindo a vantagem de ser uma opção que apresenta um peso reduzido. Neste sistema, a aeronave apresenta-se com a cauda mais próxima do solo, o que leva a uma menor visibilidade para o piloto, dada a atitude do avião com o nariz para cima [2].

A roda de cauda pode ser totalmente livre, “*full castoring*”, ou estar alinhada com o eixo longitudinal do avião, podendo ser bloqueada, em alguns casos pelo piloto, ou estar equipada com molas de auto-centragem [1].

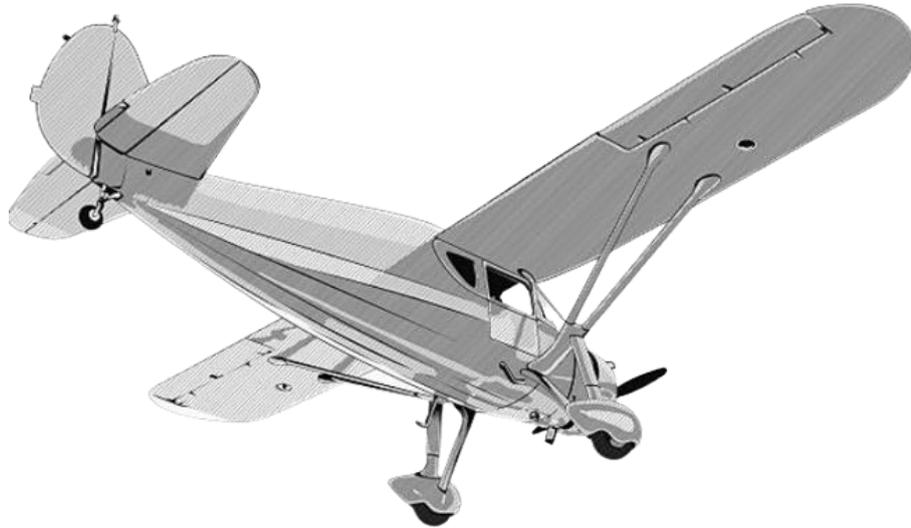


Fig. 1. Configuração convencional do trem de aterragem [3]

A configuração em triciclo, exemplificada na Figura 2, é caracterizada por um trem principal, localizado perto do centro de gravidade da aeronave e por um trem localizado no nariz da aeronave, fazendo com que a aeronave esteja nivelada com o solo. Esta configuração proporciona maior estabilidade nas operações de solo, facilitando o seu controlo, tornando-se especialmente importante nas aterragens e descolagens [1].

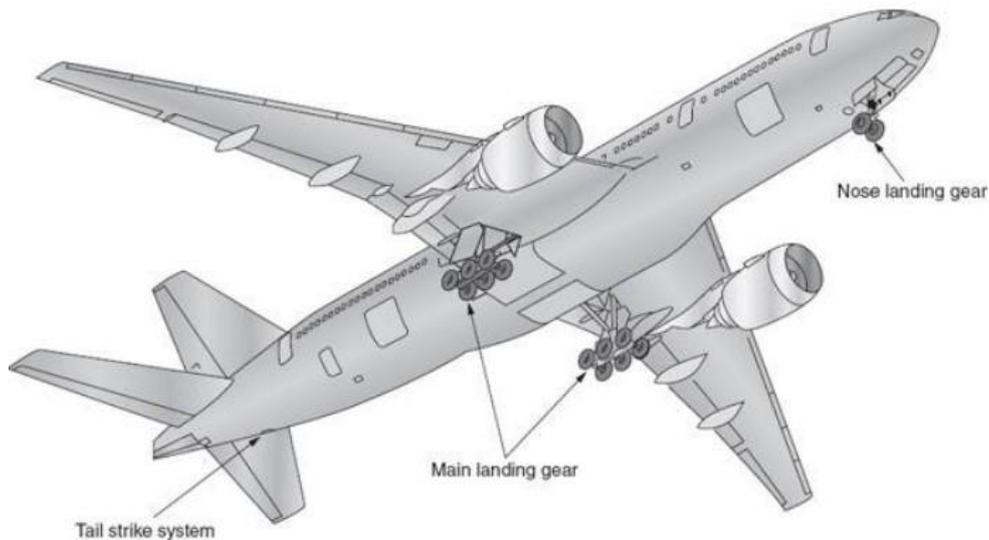


Fig. 2. Configuração em triciclo do trem de aterragem [2]

2.4. Configuração do trem principal

O MLG pode encontrar-se instalado nas asas e/ou na fuselagem, consoante o tipo e o modelo da aeronave. A sua principal função é amortecer e suportar grande parte do impacto durante a aterragem, além de permitir as manobras no solo, as cargas horizontais, laterais e de torção. A disposição do rodado pode assumir as seguintes configurações, conforme ilustrado na Figura 3 [1]:

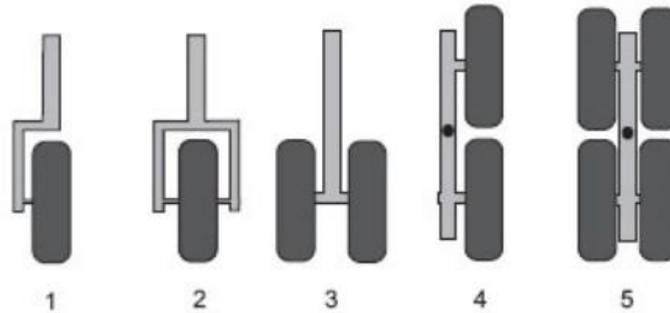


Fig. 3. Configuração do rodado do MLG [1]

1. Meia forquilha;
2. Forquilha;
3. Rodas gémeas;
4. Rodas de tendem;
5. Suporte para 4 ou 6 rodas.

2.5. Constituição de trens de aterragem em aeronaves a motor complexas

A necessidade de acionamento dos diversos sistemas da aeronave iniciou-se na década de 1920, com a utilização de fluídos hidráulicos para a operação dos LG, do sistema de travagem e da movimentação dos *flaps*. Foi em meados da década de 50 que os equipamentos hidráulicos e pneumáticos começaram a ser mais preponderantes na aviação comercial, com o desenvolvimento de normas, procedimentos e com a evolução tecnológica.

Hoje em dia, na indústria aeronáutica, o acionamento dos sistemas relacionados com o LG, como a extensão e retração da perna do trem, os sistemas de travagem, direção e amortecimento, são realizados através de diversos métodos, seja de forma pneumática, hidráulica, ou através de motores elétricos. Neste subcapítulo irão ser abordados os

diferentes métodos de transmissão de movimento, bem como as estruturas e sistemas principais do MLG e NLG.

O sistema hidráulico, mais comum devido à sua fiabilidade e simplicidade, é utilizado nos amortecedores, sistemas de travagem e direção e nos controlos de voo. Existem, no entanto, desvantagens associadas a este sistema, como o volume de espaço ocupado, o peso, o elevado ruído e a gestão dos resíduos de acordo com a legislação ambiental [4].

O sistema elétrico é normalmente utilizado em trens de menores dimensões, como os que se encontram em aviões ligeiros. Um motor elétrico, ligado a um fuso sem-fim, faz movimentar a perna do trem, originando a extensão ou retração do mesmo. Este movimento é limitado por sensores fim de curso que cortam a fonte de energia do motor quando o trem se encontra na posição em baixo ou em cima [1].

O sistema pneumático é semelhante ao sistema hidráulico, utilizando, no entanto, pressão pneumática gerada pelos estágios de compressão dos motores *turbofan*, em vez de bombas hidráulicas.

A maioria dos LG retráteis e atuados hidraulicamente, são constituídos por 3 atuadores distintos. O atuador de maiores dimensões executa a retração/extensão do LG, efetuando uma força em relação a um eixo de rotação, de modo a possibilitar a sua elevação após a descolagem, face à resistência do seu próprio peso e das cargas aerodinâmicas, ou a sua extensão durante as manobras de aproximação à pista de aterragem. Os outros 2 atuadores são responsáveis por bloquear o trem na posição em baixo e em cima e por abrir e fechar as portas do poço do trem [4].

Trem principal

O MLG é composto pela perna do trem, cuja estrutura contempla o amortecedor e a plataforma das rodas, pelos diversos atuadores de extensão/retração, de abertura de portas, de bloqueio do trem, e de posição do trem durante a aterragem, pela tesoura também denominada por “*torque link*”, pela unidade de travagem e rodas e pelas portas, conforme ilustra a Figura 4.

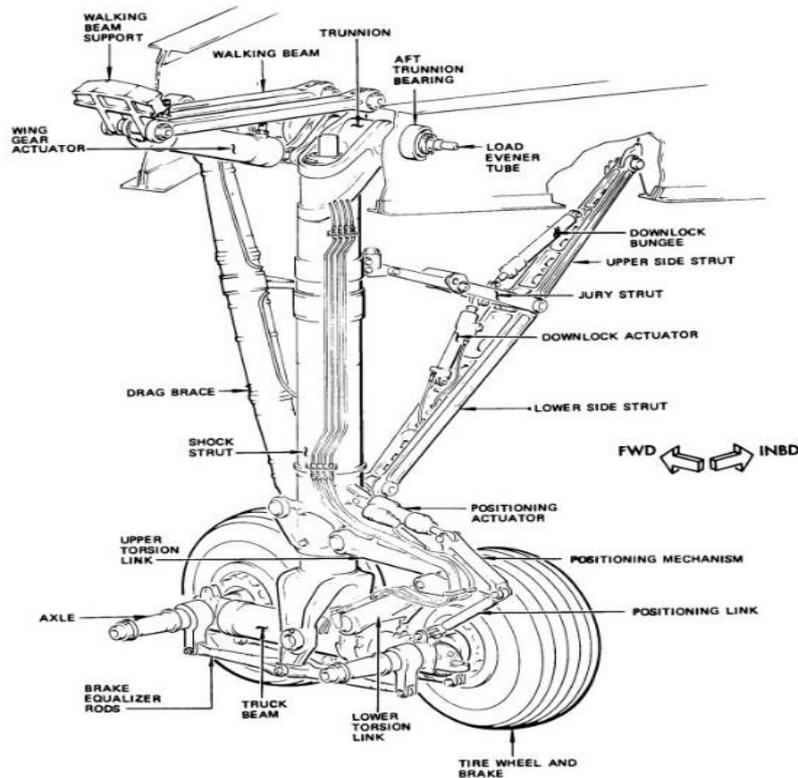


Fig. 4. Estrutura do trem principal [2]

Trem de nariz

O NLG, apesar de estar sujeito a cargas inferiores em relação ao MLG, pode apresentar-se de igual forma complexo, devido a requisitos como a capacidade de virar lateralmente através do sistema de direção, o amortecimento de oscilações durante o rolamento, a auto centragem das rodas, precedente à retração da perna do trem, a interligação entre os pedais no *cockpit* e a perna do trem e em alguns casos, um dispositivo que faz parar a roda no interior do poço do trem, de forma a evitar um efeito giroscópico [1].

Perna do trem

A perna do trem é um membro estrutural vertical que integra o mecanismo de amortecimento óleo-pneumático, estando fixa ao quadro da aeronave através de um membro estrutural fixo (*trunnion*), que permite o movimento de extensão/retração em torno deste *pivot*. A perna do trem é também designada por cilindro do mecanismo de amortecimento, uma vez que no seu interior se encontra o pistão que efetua o amortecimento do sistema. Na extremidade oposta encontra-se a plataforma das rodas [2].

Sistema de amortecimento óleo-pneumático

Este sistema utiliza dois fluídos como meio de amortecimento das cargas absorvidas durante a aterragem. A perna superior do trem consiste no cilindro superior do sistema, que é carregado com óleo hidráulico. O óleo encontra-se em duas câmaras ligadas por orifícios calibrados, cuja função é restringir a sua passagem e regular a razão de compressão do gás. A perna inferior do trem, acoplada à plataforma das rodas, é carregada com gás (azoto), e move-se no interior do cilindro superior. Tal como demonstrado na Figura 5, existe um pistão com movimento livre que serve de separação entre as câmaras dos fluídos [1].

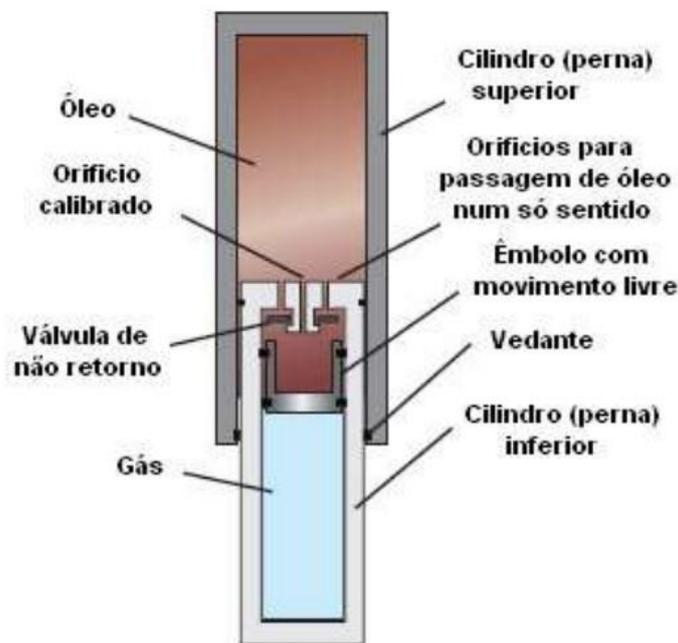


Fig. 5. Amortecedor óleo-pneumático [1]

Durante uma aterragem, a carga inicial leva à recolha da perna inferior, levando à compressão do gás e à passagem de óleo da câmara superior para a inferior. Nesta fase, cuja carga aplicada é máxima, e o amortecedor tem de absorver e dissipar a energia provocada pelo peso do avião e pela sua velocidade vertical, o óleo flui pelos orifícios calibrados. Na fase de recuperação do amortecedor, as válvulas anti-retorno restringem a passagem do óleo em alguns orifícios de passagem de modo a suavizar a recuperação.

Plataforma das rodas

A plataforma das rodas, usualmente designada por “*bogie*” constitui o membro estrutural que integra as rodas e os seus eixos, o sistema de travagem, o mecanismo responsável pela correta posição das rodas durante a aterragem, os suportes de reboque e de elevação da aeronave.

Atuadores:

Retração e extensão do LG

O atuador responsável pela retração e extensão do LG tem como função a recolha do trem da sua posição em baixo para a posição em cima e vice-versa, permitindo o seu armazenamento na estrutura da aeronave. Para retrain o trem, é efetuada a extensão do pistão do atuador, uma vez que é gerada uma força superior neste movimento, devido à maior área de contacto entre o fluído hidráulico e o pistão. Na retração do pistão a área de contacto é inferior devido à haste do mesmo, sendo produzida uma menor força. Este fator é essencial uma vez que durante a retração do trem é necessário superar o peso do sistema e a carga aerodinâmica.

Retração e extensão das portas

A retração e extensão das portas é efetuada através de atuadores hidráulicos. Em alguns modelos de aeronaves, a retração da porta é executada enquanto a perna do trem se encontra em posição para a aterragem, pelo que estes atuadores operam 2 vezes por ciclo de aterragem.

Bloqueadores

Tanto o trem como as portas possuem membros de bloqueio de posição para evitar o seu acionamento indevido durante a operação da aeronave. O desbloqueamento deste sistema de segurança pode ser feito mecanicamente ou através de um atuador hidráulico. Estes atuadores são acionados na posição em cima e em baixo, quer da perna do trem como das portas.

Mecanismo de posição da plataforma das rodas

Este dispositivo consiste num atuador instalado entre a plataforma das rodas e a perna do trem, que mantém a plataforma das rodas numa posição inclinada.

O principal propósito desta configuração, está relacionado com a redução de espaço necessário para armazenar o LG na fuselagem e asa da aeronave, razão pela qual, cada fabricante adota a posição mais conveniente para cada modelo de aeronave.

O atuador mantém exercida a pressão hidráulica contra a força resultante do peso da aeronave, de modo a evitar o ressalto do LG no primeiro contacto com o solo. Quando as rodas traseiras se encontram em contacto com a pista de aterragem, abre uma válvula de alívio de pressão, que permite o contacto de todas as rodas com o solo.

Quando o atuador se encontra em compressão total, aciona o sistema de deteção terra/ar “*air/ground sensing unit*” que ativa os *spoilers*, o sistema de travagem automático, os *thrust reversers*, a despressurização, entre outros sistemas.

Sistema de direção

O sistema de direção, na maioria das aeronaves, encontra-se no NLG e permite a execução das manobras de solo no caminho de circulação (*taxiway*), reduzindo o desgaste dos pneus e dos travões. As aeronaves de grande porte requerem a aplicação de elevadas forças nas rodas do NLG para desempenhar um controlo de direção eficiente, de modo que em alguns aviões, como no Boeing 777 e no Airbus A380, o MLG é equipado também com um sistema de controlo direcional de modo a diminuir o desgaste dos pneus e o raio de viragem [2].

O sistema de direção pode ser controlado pelo piloto através dos pedais do *rudder*, através de um manípulo de direção no cockpit, ou através de uma combinação de ambos os sistemas. O controlo de direção é conseguido através de dois atuadores hidráulicos controlados por uma válvula de controlo direcional que direciona a pressão hidráulica para o cilindro que estiver a ser utilizado, através de tirantes que interligam os controlos do piloto com a válvula [2].

Amortecedor anti vibração da roda de nariz “*shimmy damper*”

Atuador hidráulico que amortece a oscilação da roda de nariz, através da restrição da passagem de óleo por orifícios calibrados no interior do cilindro. O corpo do atuador encontra-se fixo ao cilindro superior da perna do trem, sendo a haste ligada ao cilindro inferior que compreende o cubo e a roda de nariz. Quando a roda tende a oscilar, o fluido hidráulico movimenta-se entre as câmaras do cilindro de forma restrita, limitando o movimento vibrátil da roda.

Portas do trem

As portas do trem permitem a recolha dos LG retráteis, dando acesso ao compartimento do poço do trem onde ficam alojados. As portas têm o objetivo de manter a aerodinâmica da fuselagem, de forma a não comprometer a performance da aeronave. Algumas das portas podem encontra-se ligadas à perna do trem, abrindo e fechando em simultâneo com o mesmo, ou ter atuadores próprios [1].

Torque link

O *torque link* é um membro estrutural que liga a perna do trem ao cilindro inferior, cuja função é evitar o movimento de torção entre os mesmos, mantendo a roda alinhada com o eixo longitudinal da aeronave. Em alguns modelos de aeronaves, este sistema serve também para reter o pistão do amortecedor no interior da perna do trem durante a retração do LG [2].

Unidade de travagem

Os travões estão concebidos para abrandar e parar a aeronave e facilitar as manobras de solo. O seu funcionamento baseia-se na transferência da energia cinética das rodas em energia térmica, através da fricção entre uma superfície fixa presente na plataforma das rodas e uma superfície móvel ligada às rodas. O funcionamento deste sistema é concretizado através de pressão hidráulica, que pode provir de um sistema hidráulico independente para os travões, ou do sistema hidráulico da aeronave [1].

Os travões podem ser de maxilas, embora pouco utilizados, de disco único, utilizados geralmente em aeronaves ligeiras e de discos múltiplos, cuja utilização abrange aviões ligeiros de elevada velocidade e aviões de médio e grande porte [1].

- Travões de disco único

Este sistema consiste num disco ligado à jante, em dois calços de fricção fixos à carcaça e atuados por um êmbolo, num cilindro ligado ao pedal de comando do leme e num circuito hidráulico. A força exercida no pedal aciona a bomba do cilindro principal, que transmite a pressão hidráulica ao êmbolo, acionando os calços de fricção que exercem atrito ao disco da roda, executando a ação de travagem. A recuperação dos calços na ausência da ação de travagem é obtida através de molas de recuperação [1].

- Travões de disco múltiplo

A necessidade de uma travagem mais eficaz devido às velocidades de aterragem superiores e ao peso das aeronaves, foi conseguida através de um sistema de travagem mais complexo, embora com o mesmo princípio de funcionamento do anterior.

O sistema, ilustrado na Figura 6, consiste num bloco de travões instalado no cubo da roda ligado à plataforma das rodas. O bloco é constituído por um conjunto de discos fixos, ligados ao tubo de torque e por um conjunto de discos móveis, ligados às guias do cubo. Os discos fixos possuem um material de fricção inorgânico que encosta aos discos móveis durante a travagem. Um conjunto de cilindros atuadores, através da ação hidráulica, comprime os discos e exerce a ação de travagem [1].

A unidade de ajuste automático é um sistema de ajuste da folga existente entre os discos e o material de fricção. Quando o travão é acionado, o disco de pressão arrasta um pino

de retração, que por sua vez faz comprimir uma mola através de uma guia e de uma bucha de fricção. Ao aliviar a pressão no travão, a mola descomprime e o pino em contacto com o disco de pressão, recupera a posição inicial, provocando a folga entre os discos. O pino de retração serve de monitorização do desgaste dos travões, através de uma marca de indicação visível com o travão acionado [1].

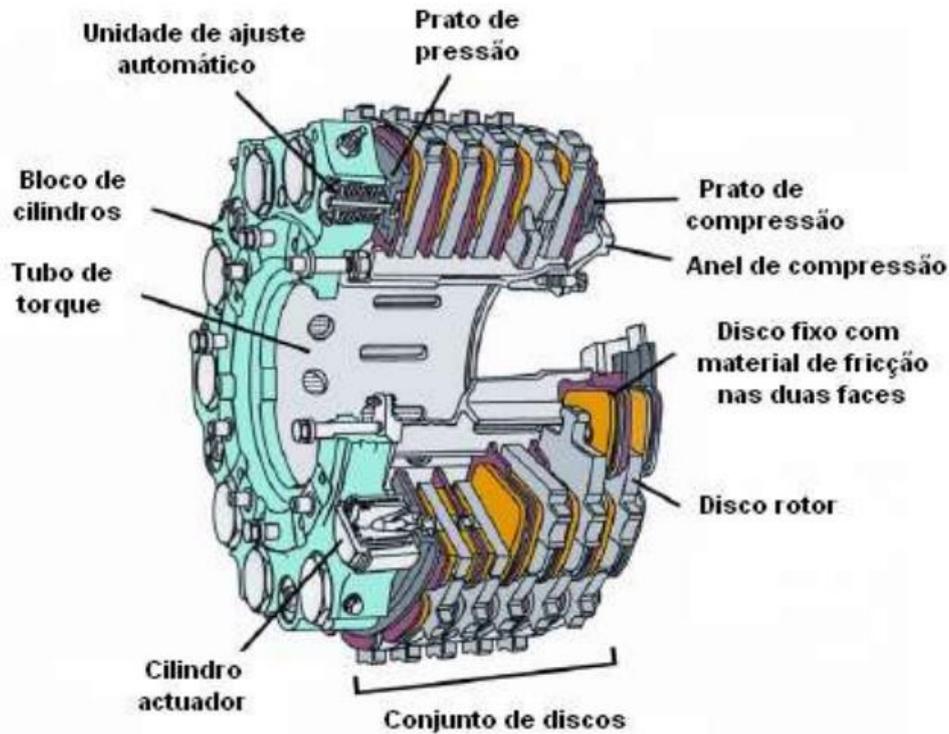


Fig. 6. Bloco de travões de disco múltiplo [1]

A eficácia do sistema de travagem deve-se não só ao elevado poder de travagem, como também da monitorização contínua das condições de operação e de sistemas de segurança concebidos para evitar as falhas, tais como sistemas anti-derrapagem e travões automáticos.

Rodas

As rodas da aeronave são compostas pela jante e pneu, e conferem a mobilidade necessária para a realização das operações de solo [1].

As jantes são desenvolvidas de forma a facilitar a substituição dos pneus e podem ser de diferentes tipos:

- Jante dividida – Composta por duas meias jantes ligadas por parafusos e porcas.
- Jante de corpo único – Peça única, de instalação mais difícil através de equipamento específico.
- Jante de aba destacável – Aba amovível para facilitação da instalação/remoção do pneu.

Os pneus da aeronave são projetados para suportar as elevadas cargas e velocidades a que são sujeitos. São compostos por sucessivas camadas de borracha ou lonas de *nylon*, sendo constituídos por uma parte tubular interior carregada com azoto comprimido que proporciona a absorção dos impactos, e por uma cobertura exterior concebida para proporcionar uma superfície de desgaste, proteger o interior do pneu, mantendo a sua forma e absorvendo as forças de travagem. A zona de vedação entre o pneu e a jante, designada por rebordo ou talão, é composta por arames de aço revestidos por borracha, que proporcionam uma superfície rígida para a montagem do pneu e asseguram um ajuste quase perfeito entre a jante e o pneu [1].

Os pneus *tubless* que não utilizam câmara-de-ar interior, utilizam fusíveis de segurança de forma a evitar o rebentamento em caso de sobreaquecimento. O material do parafuso fusível funde-se quando o azoto atinge determinada temperatura, permitindo a fuga de gás de forma controlada para evitar o rebentamento do pneu. As temperaturas de fusão do fusível são especificadas consoante um código de cores [1].

O LG é um dos sistemas mais importantes de uma aeronave, pois, embora só seja atuado em duas fases do voo, a decolagem e a aterragem, as suas características devem permitir que a aeronave atinja a velocidade necessária para a decolagem, a absorção e a dissipação da energia mecânica no impacto com a pista, na aterragem.

O LG deve, por isso, ter as seguintes características:

- Capacidade de absorção das cargas na aterragem e de amortecimento das vibrações resultantes;
- Suportar cargas laterais durante as operações do avião no solo;
- Suportar o avião no solo;
- Proporcionar a mínima fricção entre o avião e o solo;
- Possuir baixo coeficiente de resistência ao avanço.

No presente capítulo foram abordados os diferentes tipos de LG e a respetiva disposição na aeronave, as diferentes configurações das rodas no MLG e, por fim, a constituição e as diferentes formas de acionamento do MLG e do NLG.

Uma vez abordadas as características técnicas dos LG e dos seus principais componentes, dar-se-á no seguinte capítulo, início à análise de acidentes e incidentes causados por ações de manutenção nestes sistemas.

3. Estudo de casos reais

3.1. Introdução

A investigação de acidentes e incidentes na aviação civil é uma prática que contribui para tornar o transporte aéreo numa das formas mais seguras de viajar, tendo sido estabelecida pela *Internacional Civil Aviation Organization* (ICAO), na Convenção de Chicago em 1944. A União Europeia (UE) estabeleceu os princípios fundamentais para a investigação de acidentes e incidentes de aviação através da Diretiva 94/56/CE do Conselho da União Europeia, a 21 de novembro de 1994, com a finalidade exclusiva de prevenir futuros acidentes ou incidentes [5].

No capítulo anterior, foram descritas as principais características e a constituição do LG, uma vez que este sistema é de primordial importância para o voo, visto ser responsável por garantir o suporte da aeronave no solo, permitindo a sua manobrabilidade nas fases cruciais do voo, ou seja, a descolagem e a aterragem.

Porém, a falha deste sistema é responsável por um grande número de acidentes e incidentes de aviação, pelo que, no presente capítulo, ir-se-á abordar o modelo teórico do Professor *James Reason*, referente à etiologia dos acidentes em sistemas complexos, realizar um breve ponto de situação relativamente à investigação de acidentes e incidentes, com especial foco nos LG, e por último efetuar uma análise dos dados recolhidos com o intuito de averiguar as suas principais causas associadas às ações de manutenção.

3.2. O modelo teórico de *James Reason*

A importância e o estudo dos “Fatores Humanos” nos acidentes aeronáuticos são inevitáveis, uma vez que o custo do erro humano tem consequências gravíssimas no transporte aéreo. Em 1990, o Professor e Psicólogo *James Reason*, publicou o seu primeiro livro – “Human Error”, onde desenvolveu um modelo que explicita todo o mecanismo por detrás de um acidente num sistema organizacional. Este modelo foi alvo de várias revisões ao longo dos anos, sendo ilustrada na Figura 7 a sua segunda versão, que assenta em 4 elementos base:

– Processos organizacionais

Os processos organizacionais representam as atividades sobre as quais as organizações têm um controlo direto razoável, através da tomada de decisões estratégicas, dos modelos de comunicação, do planeamento e gestão dos recursos, da implementação de normas e procedimentos, da política de formação de colaboradores, entre outros [6]. Na perspetiva aeronáutica, este elemento compreende os fabricantes de aeronaves e seus componentes, as entidades regulamentadoras, as companhias aéreas, as organizações de manutenção, entre outras.

– Condições de trabalho

As condições de trabalho são fatores que têm influência no desempenho dos trabalhadores, podendo estar relacionadas com a estabilidade laboral, as qualificações e experiência profissional, a elevada carga de trabalho, a pressão, a utilização de procedimentos inexecutáveis, problemas ergonómicos, a falta de recursos no local de trabalho, tais como ferramentas inadequadas, equipamentos informáticos desatualizados ou obsoletos, iluminação deficiente, a falta de equipamentos de proteção individual (EPI's), entre outras [7].

– Falhas ativas

As falhas ativas representam ações ou inações dos elementos ativos do sistema, nomeadamente, pilotos, controladores de tráfego aéreo, técnicos de manutenção e colaboradores das operações de terra, que podem transpor as defesas do sistema e contribuir para a ocorrência de acidentes. As falhas ativas são erros ou violações que podem constituir lapsos de memória, faltas de atenção, enganos, infrações deliberadas ou não, entre outros [6].

– Defesas

As defesas são medidas ou recursos destinados a proteger e mitigar as consequências de falhas dos equipamentos e dos erros humanos. As defesas são postas em prática pelas companhias aéreas e pelas autoridades regulamentadoras, através do desenvolvimento tecnológico, da regulamentação do setor aeronáutico, da formação e promoção da qualificação dos colaboradores, entre outras medidas [6].

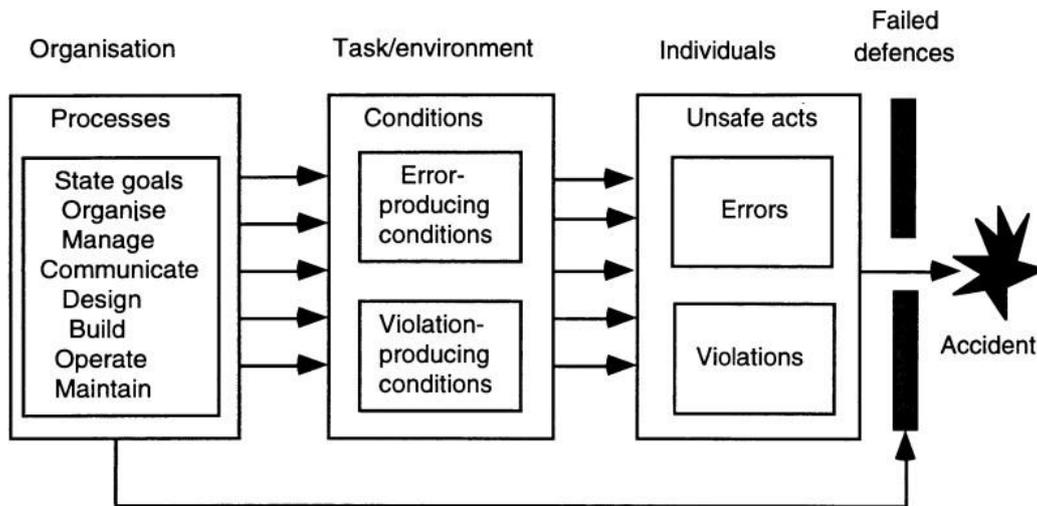


Fig. 7. Modelo Teórico de James Reason [6]

Na Figura 7, a direção de leitura efetua-se da esquerda para a direita, representando a sequência causal para o desenvolvimento de um acidente.

A sequência tem início nos processos organizacionais, por norma de cariz político e económico que, não obstante aparentem estar distantes no tempo e no espaço dos acidentes, constituem condições latentes. Condições essas que resultam de uma identificação deficiente dos perigos, podendo já estar presentes no sistema e apenas se tornarem evidentes quando as defesas são violadas [8].

As condições de trabalho dependem diretamente dos processos organizacionais, tendo influência direta no desempenho dos trabalhadores, que representam outro dos elementos do modelo de *Reason*. As falhas ativas resultam, deste modo, dos elementos ativos do sistema, que têm controlo direto sobre os riscos do mesmo [8]. É de salientar que as defesas do sistema, no presente modelo, podem falhar diretamente como consequência das condições latentes que existam, e não apenas devido às falhas ativas. Tal característica é observada no modelo através da seta que interliga os processos organizacionais às defesas [6].

No início do século XXI, 10 anos após a publicação do seu primeiro modelo, *Reason* publica o conhecido modelo denominado *Swiss Cheese Model* (SCM), ou Modelo do Queijo Suíço. O SCM é um modelo heurístico que transmite visualmente, as interações e as concatenações que existem quando um sistema complexo e bem protegido sofre um colapso catastrófico [9].

A Figura 8, ilustra as sucessivas barreiras e mecanismos de defesa de um sistema para mitigar as situações de risco e evitar as perdas ou prejuízos. As lacunas nas sucessivas camadas ilustram as falhas ativas e as condições latentes do sistema, que possibilitam a propagação dos riscos através dos mecanismos de defesa. Uma vez ultrapassadas todas as defesas do sistema, dá-se origem à inevitável ocorrência dos acidentes [9].

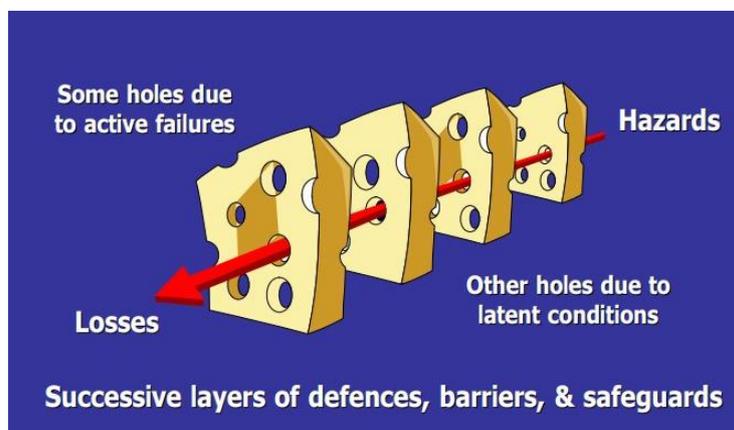


Fig. 8. Modelo do Queijo Suíço [9]

3.3. Visão geral sobre acidentes e incidentes causados por ações de manutenção nos LG

Segundo uma análise feita pela *National Aeronautics and Space Administration* – NASA, com base em acidentes e incidentes ocorridos no período de 1988 a 2003, é possível constatar que o LG corresponde ao segundo sistema, seguido dos motores, a apresentar um maior índice de ocorrências, conforme ilustra a Tabela 1 e a Tabela 2 [10].

Tabela 1. Acidentes – Origem por sistema e tipo de operação aérea [10]

System	Operation category			
	Part 121	Scheduled Part 135	Non-scheduled Part 135	Part 121 and 135 combined
Total accidents	109	33	228	370
Engine	36 (33%)	12 (36%)	111 (49%)	159 (43%)
Landing gear	23 (21%)	10 (30%)	64 (28%)	97 (26%)
Flight control	10 (9%)	3 (9%)	9 (4%)	22 (6%)
Electrical	8 (7%)	1 (3%)	12 (5%)	21 (6%)
Fuel	4 (4%)	3 (9%)	13 (6%)	20 (5%)
Hydraulic	9 (8%)	2 (6%)	7 (3%)	18 (5%)
Structure	5 (5%)	1 (3%)	7 (3%)	13 (4%)
Other	8 (7%)	1 (3%)	4 (2%)	13 (4%)
Instrumentation/ communication/ navigation	5 (5%)	0 (0%)	0 (0%)	5 (1%)
Unknown	1 (1%)	0 (0%)	1 (0%)	2 (0%)

Tabela 2. Incidentes – Origem por sistema e tipo de operação aérea [10]

System	Operation category			
	Part 121	Scheduled Part 135	Non-scheduled Part 135	Part 121 and 135 combined
Total incidents	4957	1557	1218	7732
Engine	1384 (28%)	486 (31%)	349 (29%)	2219 (29%)
Landing gear	990 (20%)	509 (33%)	558 (46%)	2057 (27%)
Other	615 (12%)	135 (9%)	47 (4%)	797 (10%)
Hydraulic	414 (8%)	57 (4%)	45 (4%)	516 (7%)
Flight control	431 (9%)	43 (3%)	28 (2%)	502 (6%)
Fuel	215 (4%)	80 (5%)	54 (4%)	349 (4%)
Structure	214 (4%)	80 (5%)	49 (4.0%)	343 (4%)
Comfort systems	246 (5%)	54 (4%)	20 (2%)	320 (4%)
Electrical	191 (4%)	64 (4%)	47 (4%)	302 (4%)
Pressurization	174 (4%)	15 (1%)	8 (1%)	197 (2%)
Instrumentation/ communication/ navigation	83 (2%)	34 (2%)	13 (1%)	130 (2%)

Na Tabela 3, são destacadas as causas mais frequentes dos acidentes com origem nos LG e sistemas hidráulicos [10].

Tabela 3. Acidentes com origem nos LG e sistemas hidráulicos – Principais causas [10]

Cause of failure/Malfunction	Operation category			Part 121 and 135 Combined
	Part 121	Scheduled Part 135	Non-Scheduled Part 135	
Total landing gear or Hydraulic System SCFM accidents	32	12	71	115
Component failure	18 (56%)	3 (25%)	34 (48%)	55 (48%)
Maintenance related	8 (25%)	4 (33%)	20 (28%)	32 (28%)
Component fatigue	7 (22%)	2 (17%)	12 (17%)	21 (18%)
Hydraulic fluid loss	8 (25%)	3 (25%)	6 (8%)	17 (15%)

No que diz respeito aos componentes do LG com maior frequência de falha ou defeito, o mecanismo de retração/extensão da perna do trem foi o que apresentou maior incidência de casos registados, conforme ilustra a Tabela 4.

Tabela 4. Acidentes com origem nos LG e sistemas hidráulicos – Principais causas [10]

Component	Frequency of failure/malfunction
Gear extend/Retract mechanism	174
Main gear tire	165
Nose gear	128
Landing gear indicating system	98
Antiskid system	90
Nosewheel steering	90
Leading edge slat	77
Generator drive	76
Main gear	68
Main gear door	58
Total	1024

Antes de se proceder ao estudo de casos reais, é fundamental contextualizar e definir alguns dos conceitos abordados neste capítulo, entre os quais:

Acidente: Representa uma ocorrência associada à operação aérea, desde o momento em que qualquer pessoa embarca na aeronave, até que todas as pessoas desembarcam, na qual resulta a morte ou ferimentos graves em pessoas, abordo ou não da aeronave, ou na qual a aeronave sofre danos substanciais que afetem a resistência estrutural, o desempenho ou as suas características de voo [8].

Incidente: Qualquer ocorrência, que não um acidente, que afete ou possa influenciar as operações de segurança na operação aérea [8].

Ao abrigo do *Title 49 – Transportation* da legislação dos Estados Unidos da América (EUA), a *Federal Aviation Administration – FAA* define e categoriza os seguintes tipos de operações aéreas conforme se enumera:

Operação aérea Part 91: Regulamentação geral no âmbito da operação da aviação geral e regras de voo, aplicável a todos os pilotos que se encontrem a operar uma aeronave [11].

Operação aérea Part 121: Aplica-se tanto a companhias aéreas internacionais como a companhias regionais e regula o transporte aéreo programado de passageiros ou de mercadorias, no território dos Estados Unidos da América e suas colónias [10].

Operação aérea Part 135: Aplica-se a companhias aéreas regionais e ao transporte particular (*charters*), regulando o transporte aéreo programado ou não de passageiros ou de mercadorias, no território dos Estados Unidos da América e suas colónias [10].

A Comissão Europeia, segundo o Regulamento (UE) n.º 965/2012, define a operação de transporte aéreo comercial da seguinte forma:

Operação de transporte aéreo comercial (CAT): “Operação realizada por uma aeronave para transportar passageiros, carga ou correio, mediante remuneração ou contra outra retribuição” [12].

As evidências deste estudo comprovam a importância da necessidade de investigar possíveis medidas de prevenção, tendo em vista a redução dos acidentes causados por ações de manutenção nos LG.

A segurança na indústria aeronáutica depende significativamente da manutenção das aeronaves. As falhas de manutenção contribuem substancialmente para a ocorrência de acidentes e incidentes. Tal como foi apresentado na Tabela 3, mais de 25% dos acidentes relacionados com os LG tiveram origem em falhas de manutenção.

Tendo em conta uma estatística mais atual, compreendida entre 2017 e 2021, realizada pela *International Air Transport Association – IATA*, onde foram analisados os acidentes numa perspetiva global, foi possível verificar que aproximadamente 14% destes tiveram origem em problemas nos LG. As operações de manutenção e o incumprimento de procedimentos constituíram 45% e 39% respetivamente [13].

3.4. Análise de acidentes e/ou incidentes no sistema do trem de aterragem

Neste subcapítulo serão analisados, através da ferramenta “*Case Analysis and Reporting Online*”, da *National Transportation Safety Board* (NTSB) e do repositório eletrónico *SKYbrary*, acidentes e/ou incidentes procurando verificar de que modo a manutenção influenciou o seu desfecho e quais foram os resultados subsequentes a nível da prevenção de ocorrências semelhantes.

Os critérios de inclusão no estudo são os seguintes: Ocorrências nos últimos 11 anos; Aeronaves a motor complexas; Falhas nos LG originadas pela manutenção.

Através da utilização desta metodologia, foram selecionados 19 casos de estudo que cumpriam os critérios, dos quais serão analisados, aleatoriamente, 7 acidentes e/ou incidentes.

Caso de estudo 1:

Acidente CEN15LA140 [14]

No dia 9 de fevereiro de 2015, um *Embraer ERJ 190 100 IGW* operado pela companhia *US Airways*, aterrou no aeroporto *George Bush Intercontinental Airport (IAH), Houston, Texas*, com o NLG retraído. Não houve feridos nos 4 membros da tripulação nem nos 51 passageiros, tendo sido verificado apenas danos substanciais na fuselagem inferior da parte dianteira da aeronave. A tripulação tentou efetuar o acionamento alternativo manual do LG sem sucesso [14].

Causas:

A investigação apurou que a falha na extensão do NLG ficou a dever-se a uma ordem de comando de direção inadvertida, do módulo de controlo de direção do trem de aterragem dianteiro (NWSCM). Este, contém uma função (*drift monitor function*) que garante que o trem se encontra na posição neutra (centrado) continuamente, desde o momento em que é retraído e mantido no respetivo compartimento na aeronave. No momento em que a tripulação efetuou a aproximação e acionou o LG, a pressão hidráulica no sistema de direção do NLG provocou a sua rotação prematura, devido ao comando de direção do NWSCM que permaneceu ativo, levando ao bloqueio do NLG no interior da aeronave. A análise dos dados de voo permitiu concluir que os sensores de *feedback* do

NWSCM foram instalados incorretamente, levando a que o sistema entrasse em *safe mode* e tenha ficado ativo o último comando. Apesar da documentação de manutenção relativa à ordem de trabalho ter sido dada como concluída, a investigação apurou que a instalação não foi completada com sucesso [14].

Consequências:

- Publicação de 3 *service bulletins* (SBs) por parte da Embraer para prevenir a ocorrência de eventos semelhantes.
- Danos substanciais na aeronave.

Caso de estudo 2:

Acidente N° BEA ei-c121116 [15]

No dia 16 de novembro de 2012, um *Airbus A300-B4* operado pela companhia *Air Operators*, aterrou no aeroporto de Bratislava, Eslováquia. Sensivelmente 6 segundos após a aterragem, a tripulação constatou vibrações gradualmente superiores, tendo utilizado os motores para abrandar a aeronave. Com o aumento das vibrações e o desvio da aeronave para o lado esquerdo da pista de aterragem 22, a tripulação decidiu aplicar a travagem manual máxima e tentou corrigir a direção através do *rudder*. O comandante da aeronave, face aos rápidos eventos que sucederam ao início das vibrações, não se lembrou de utilizar a travagem assimétrica para corrigir a trajetória da aeronave.

O avião acabou por sair da pista de aterragem e colidir com uma estrutura de betão e diversos sistemas de iluminação, tendo o NLG colapsado [15].

Causas:

A investigação do acidente concluiu que durante o *overhaul* efetuado 40 horas de voo (37 ciclos de voo) antes do acidente, uma das anilhas (representada a vermelho) do eixo do tirante de torção, ilustrada na Figura 9, foi instalada incorretamente (ao contrário) permitindo que a porca de fixação do eixo se tenha soltado.

Desta forma deu-se por concluído que a perda do controlo direcional da aeronave se deveu à incorreta instalação deste sistema. O colapso do NLG foi consequência do embate com

uma caixa de inspeção de betão, nas imediações da pista de aterragem, que estaria à superfície [15].

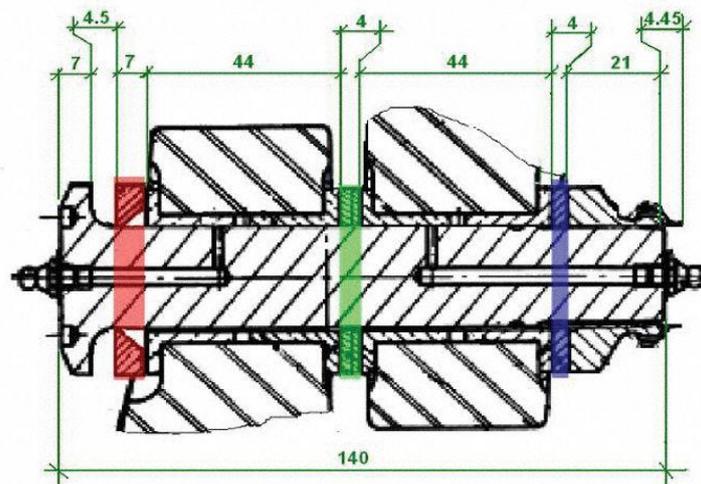


Fig. 9. Vista em corte do veio do tirante de torção superior e inferior do NLG [15]

Na Figura 10, é possível constatar a diferença entre o que seria a correta montagem do conjunto constituído pelo veio, rolamentos, anilhas espaçadoras e de bloqueio e porca, e a montagem efetuada durante a intervenção de manutenção precedente ao voo.

A incorreta montagem da anilha levou a que o raio de concordância (*fillet*) da cabeça do veio, não ficasse em contacto com o chanfro da anilha, originando uma folga de 4.5mm entre ambos os componentes. Este erro poderia ter sido verificado durante a montagem, na extremidade oposta do veio, conforme ilustrado na Figura 11, uma vez que a anilha de bloqueio estriada não poderia ser corretamente instalada, levando assim a que o veio rodasse livremente, dando origem ao desaperto da porca [15].

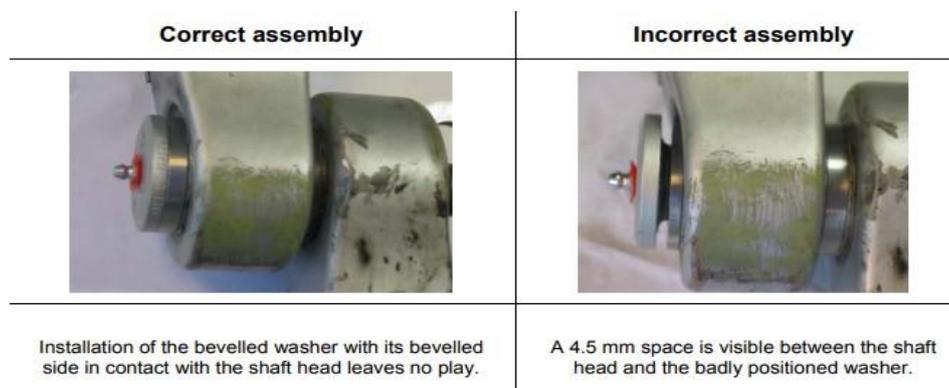


Fig. 10. Demonstração da correta e incorreta montagem da anilha espaçadora [15]

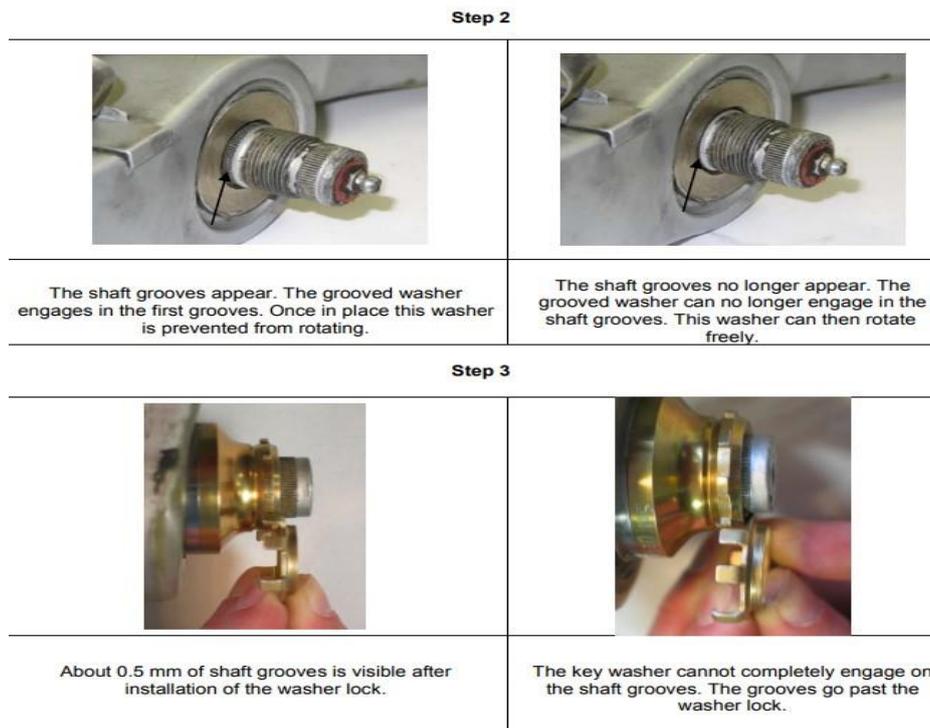


Fig. 11. Demonstração da influência na incorreta montagem da anilha espaçadora² [15]

Consequências:

- A Airbus publicou recomendações (*Operators Information Transmission (OIT) ref 999.0014/13*) referentes à manutenção do tirante de torção do NLG para os modelos A300/A300-600/A310/AST, visando chamar à atenção da importância da correta montagem das anilhas. Foi também incluído um aviso relativo à remoção/instalação dos tirantes de torção no *Aircraft Maintenance Manual (AMM) 32-21-15 p. Block 401* [15].
- Implementação de regulamento pela EASA, com a integração dos pontos referidos no suplemento A, do Anexo 14 ICAO, Volume 1 – *Design and technical operation of aerodromes*, referente à existência de equipamentos ou objetos na faixa das pistas de aterragem. A emissão da *certification specification CS ADR-DSN.B.165 Objects on Runway strips* estabelece os requisitos para os objetos na área envolvente das pistas de aterragem [15].
- Danos substanciais na aeronave.

² Pretende-se com esta ilustração demonstrar a diferença entre a correta e incorreta montagem da anilha espaçadora e a respetiva consequência. A secção estriada do veio não se encontra disponível para a aplicação da anilha de bloqueio.

Pelo ICAO – Anexo 14,

“Within the general area of the strip adjacent to the runway, measures should be taken to prevent an aeroplane’s wheel, when sinking into the ground, from striking a hard vertical face. Special problems may arise for runway light fittings or other objects mounted in the strip or at the intersection with a taxiway or another runway. In the case of construction, such as runways or taxiways, where the surface must also be flush with the strip surface, a vertical face can be eliminated by chamfering from the top of the construction to not less than 30 cm below the strip surface level. Other objects, the functions of which do not require them to be at surface level, should be buried to a depth of not less than 30 cm.” [16].

Caso de estudo 3:

Acidente N° BEA g-ld110723 [17]

No dia 23 de julho de 2011, um *Boeing B737-300* operado pela companhia aérea *Jet2.com*, aterrou na pista 27R do aeroporto *Paris Charles de Gaulle*, tendo sido verificadas vibrações violentas provenientes do MLG. A trajetória da aeronave fugiu 10 metros do centro da pista tendo sido corrigida quando a velocidade foi reduzida para os 140km/h, tendo as vibrações que se faziam sentir parado por completo. Não foram verificados quaisquer feridos dos 128 passageiros e 4 membros da tripulação a bordo [17].

Causas:

A investigação efetuada pela BEA deu conta que o *racore* da mangueira hidráulica do amortecedor anti vibração da roda de nariz, designado por *“shimmy damper”*, não tinha sido conectado ao sistema hidráulico da aeronave, conforme ilustra a Figura 12. Esta falha deu-se durante a intervenção de manutenção anterior ao voo, onde foi substituído o sistema do trem de aterragem por completo.

A severidade do acidente não foi superior porque no decorrer da ação de manutenção foi montado um bujão no acessório hidráulico que fechou o circuito, impedindo a perda total do sistema hidráulico da aeronave. O teste realizado após esta intervenção de manutenção consiste em efetuar 10 ciclos de operação do LG com a aeronave elevada do nível do solo, no entanto, esta verificação operacional não põe em funcionamento o amortecedor que deu origem à falha, pelo que não foi possível detetar o problema [17].

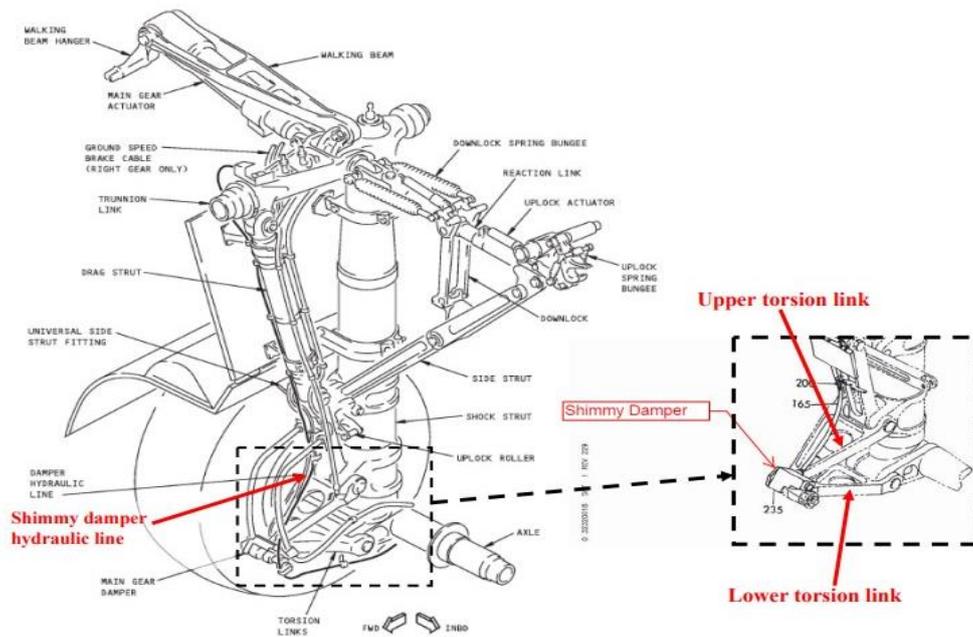


Fig. 12. Vista geral do trem de aterragem Boeing B737-300 [17]

A ordem de trabalho referente à instalação do trem de aterragem direito nº32-11-00-404-096 "Main Landing Gear Installation", publicada pela Boeing, por sua vez tem 42 subtarefas sendo a subtarefa nº32-11-00-034-169, ilustrada na Figura 13, a aplicável à ligação hidráulica, ainda que não especifique o amortecedor em concreto.

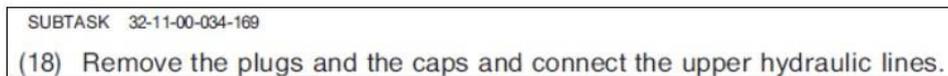


Fig. 13. Sub-tarefa nº32-11-00-034-169 – Boeing [17]

Qualquer tarefa presente numa ordem de trabalho é efetuada por um mecânico e verificada pelo menos por um supervisor. Assim sendo, ainda que tenha existido uma incorreta instalação nas ligações hidráulicas, houve uma falha técnica na inspeção do trabalho realizado, resultante do incumprimento de um procedimento.

A investigação concluiu que a carga de trabalho da equipa no dia em que se procedeu à substituição do trem de aterragem excedeu as suas capacidades. A necessidade de uma reparação não planeada a uma terceira aeronave, quando equipa já estava com dificuldade em terminar o trabalho foi o fator que acabou por dar origem à falha. O supervisor ao tentar distribuir a equipa para as 3 diferentes intervenções, e acusando efeitos de fadiga dado ao excessivo número de horas de trabalho acumuladas, permitiu que o erro da equipa de manutenção tivesse passado despercebido dando origem ao acidente [17].

Consequências:

Em setembro de 2011 a companhia *Jet2.com* implementou as seguintes ações corretivas [17]:

- Publicação de um procedimento técnico relativo à inspeção do tamponamento de sistemas hidráulicos, pneumáticos e de gás, através da utilização de etiquetas visíveis nos componentes de corte e retenção.
- Adição de operações na ordem de trabalho em questão. Verificação da conexão hidráulica do amortecedor de oscilações laterais e verificação independente por parte de um segundo supervisor.
- Implementação de um planeamento de trabalho com especial atenção na redução da fadiga dos colaboradores.
- Este evento foi integrado no programa de formação dos técnicos de manutenção com o objetivo de prevenir novos incidentes.

Em novembro de 2011 a *Boeing* implementou as seguintes ações corretivas [17]:

- Publicação de 2 revisões temporárias no AMM dos modelos B737-300, -400 e -500 relacionadas com a remoção/instalação do amortecedor anti vibração da roda de nariz, onde é especificada a reinstalação das linhas hidráulicas e com a instalação do MLG. As revisões temporárias foram incorporadas no AMM, na versão de 25 de março de 2012.

Caso de estudo 4:

Incidente DCA12IA096 [18]

No dia 17 de junho de 2012, um *Airbus A320* operado pela companhia aérea *JetBlue Airways* partiu do aeroporto *Las Vegas McCarran International Airport*, com a perda de 2 dos 3 sistemas hidráulicos (identificados por verde, amarelo e azul). Durante a retração do LG (mal sucedida), o sistema hidráulico verde perdeu pressão, levando a um período prolongado de operação da unidade de transferência de potência (PTU), que consequentemente levou ao seu sobreaquecimento e à perda de pressão do sistema hidráulico amarelo. A aeronave encontrava-se com uma anomalia pendente no sistema elétrico de controlo dos *flaps*, fator que, associado à perda de pressão hidráulica, levou à

inoperação dos *flaps* após a descolagem. A tripulação, após ter coordenado com o controlo de tráfego aéreo (ATC), manteve uma rota de voo a 12 000 ft destinada a executar as *checklists* necessárias, sem sucesso. A tripulação manteve a rota até que fosse atingido o peso máximo de aterragem, período no qual foi reativado o sistema hidráulico amarelo e calculada a distância necessária para a aterragem (8 500 ft). A aterragem foi executada com êxito não tendo sido verificados feridos, dos 149 passageiros e 5 membros da tripulação a bordo. A aeronave sofreu danos ligeiros no sistema hidráulico.

Causas:

A investigação deu por concluído que existia uma fuga numa mangueira hidráulica do cilindro de retração da porta do MLG direito, que deu origem à perda de pressão do sistema hidráulico verde e por consequência o sobreaquecimento do PTU.

O facto de o operador aéreo não ter adotado os SBs emitidos pelo fabricante, com os procedimentos necessários para a prevenção desta ocorrência, contribuiu para o desfecho deste incidente.

Nesta aeronave, o sobreaquecimento do PTU emite um alerta no cockpit, no entanto, esta mensagem de aviso é inibida até à altitude de 1500 ft, facto que não permitiu a desativação do respetivo sistema.

Consequências:

- A 20 de fevereiro de 2007, a *Airbus* emitiu o primeiro de quatro SBs – SB A320-29-1115, que definia ações corretivas à logica de inibição do PTU, com o objetivo de prevenir perdas de pressão nos sistemas hidráulicos verde e amarelo, devido a um baixo nível de fluido hidráulico nos reservatórios. A nova lógica de inibição do PTU, foi projetada para desligar o sistema face à condição de pressão baixa durante mais de 6 segundos, e antes dos motores atingirem a velocidade de rotação de voo. À data do acidente, a *JetBlue Airways*, ainda não tinha incorporado estas recomendações na sua frota de aviões.
- Após o incidente, a 16 de outubro de 2012, a *Airbus* desenvolveu um *retrofit* otimizado à logica de ativação e à instalação elétrica do PTU, constante no SB A320-29-1156.

Caso de estudo 5:

Acidente DCA13FA094 [19]

No dia 18 de maio de 2013, um *Bombardier* DHC8 operado pela companhia *Piedmont Airlines*, aterrou no aeroporto de *Newark*, Nova Jérсия, com o LG intencionalmente retraído, por incapacidade de acioná-lo na aproximação ao aeroporto. Durante a aproximação inicial, e após uma passagem baixa à pista, foi confirmado que a extensão do MLG esquerdo falhou, pelo que a tripulação procurou executar a extensão manual do trem, sem sucesso. Após várias tentativas falhadas de acionar o LG, discutidas com o supervisor de manutenção, tais como o sistema alternativo de acionamento do LG ou a sua extensão durante a aplicação de uma força G positiva à aeronave, o comandante decidiu, em concordância com o supervisor de manutenção, executar a aterragem com o LG completamente retraído de forma a minimizar a provável perda de controlo direcional da aeronave. Não foram verificados feridos dos 31 passageiros e 3 membros da tripulação a bordo. Os danos na aeronave foram substanciais na parte inferior da fuselagem.

Causas:

A investigação determinou como causa provável do acidente, o facto do sistema de bloqueio em cima do MLG ter congelado, devido à falta de lubrificação, e aos níveis de desgaste da tranca do mecanismo, fatores que impossibilitaram a tripulação de utilizar o sistema alternativo de acionamento do MLG.

Os procedimentos de manutenção da aeronave referenciam, numa ordem de trabalho, a necessidade de inspeção do mecanismo de bloqueio, a cada 220 horas de voo, sendo necessário proceder à sua lubrificação sempre que se encontre sob prisão. No entanto nas 11 inspeções prévias, o mecanismo não necessitou de ser lubrificado.

Consequências:

- Danos substanciais na aeronave.

Após o acidente a companhia *Piedmont* implementou as seguintes medidas corretivas:

- Alterações aos procedimentos de manutenção que compreenderam a inspeção e lubrificação dos mecanismos de bloqueio e a verificação operacional do sistema alternativo de acionamento do LG na frota de aeronaves;
- Revisão da ordem de trabalho relativa à inspeção do mecanismo de bloqueio com obrigatoriedade de lubrificação do sistema a cada 500 horas de voo;
- Revisão da inspeção pré-voo com a finalidade de incluir a verificação física do mecanismo de bloqueio (transmitida por escrito a todos os membros de tripulação);
- Modificação e aperfeiçoamento das *checklists* de acionamento alternativo do LG e de aterragem forçada;
- Elaboração de uma nova *checklist* designada “*Landing gear fails to extend*”.
- Aperfeiçoamento dos procedimentos de comunicação entre a tripulação e o departamento de manutenção durante o *troubleshooting* de eventos em pleno voo.

Caso de estudo 6:

Acidente ERA20LA008 [20]

No dia 7 de outubro de 2019, um *Raytheon Hawker 800XP* operado pela companhia aérea *Delta Private Jets*, aterrou no aeroporto *Southwest Florida International Airport* com o NLG retraído, provocando danos substanciais na fuselagem da aeronave. Após a descolagem, o piloto observou uma luz de aviso em como o NLG permanecia em trânsito, enquanto que o MLG se encontrava por essa altura, totalmente retraído. Face à tentativa mal sucedida de proceder à extensão do NLG através da *checklist* adequada, a tripulação optou pela aterragem de emergência no aeroporto internacional da Florida, devido à distância disponível de aterragem de 12 000 ft. Não resultaram quaisquer ferimentos nos 2 membros da tripulação e nos 2 passageiros.

Causas:

A investigação do acidente concluiu que a haste do atuador de retração e extensão do trem se encontrava desconectada do seu ponto de ligação, conforme é apresentado na Figura 14, devido à provável falta de instalação da chaveta na porca de bloqueio da haste. No decorrer dos 124 ciclos de operação do LG, desde o *overhaul* que ditou a última ação de manutenção ao NLG, a porca ter-se-á desapertado levando à separação dos componentes e conseqüente impedimento de atuação do sistema.

Consequências:

- Danos substanciais na aeronave.
- Deste acidente não foram reportadas quaisquer ações corretivas a nível organizacional.

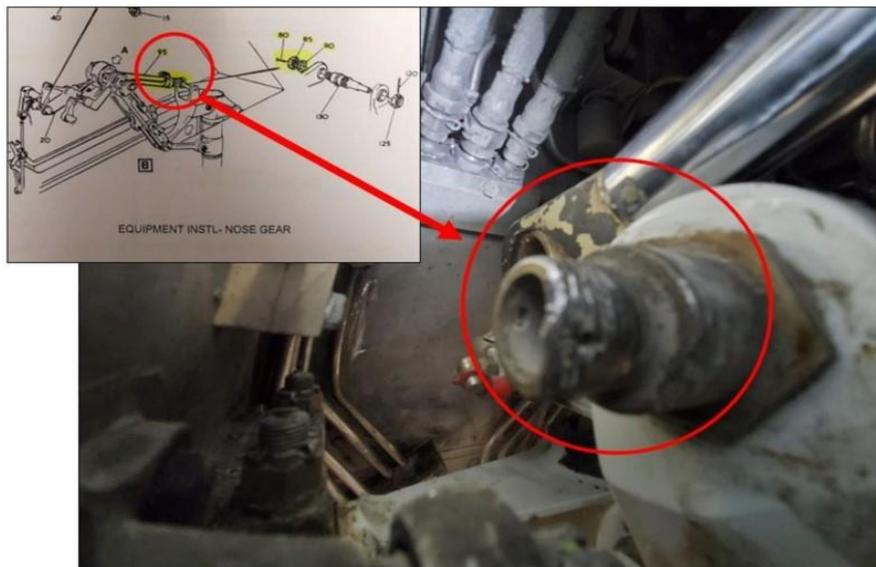


Fig. 14. Sistema de retração e extensão do NLG³ [20]

Caso de estudo 7:

Acidente WPR13FA227 [21]

No dia 13 de maio de 2013, um *Learjet 35A* operado pela companhia *Evergreen International Aviation, Inc*, aterrou no aeroporto de *McMinnville Municipal Airport*,

³ Fotografia pós-acidente da haste do atuador fora do seu ponto de conexão e Illustrated Parts Catalog do NLG.

Oregon, sem a operacionalidade dos sistemas de travagem, direção e inversão do impulso, acabando por sair da pista de aterragem e entrar numa vala. O voo realizado teve como finalidade devolver a aeronave à sua operadora, após a ação de manutenção na empresa *West Star Aviation*, no Colorado, onde foi atualizado o sistema de gestão de voo e realizada uma inspeção de certificação do transdutor do tubo de *pitot* e do sistema de separação vertical mínima. A aeronave ficou com danos substanciais na fuselagem, na asa e no NLG. Não foram verificados ferimentos nas 3 pessoas a bordo.

Causas:

A investigação determinou como causa provável do acidente, a falha de manutenção ao reinstalar os sensores de posição do MLG, levando a que o sistema elétrico da aeronave não assumisse a condição de aeronave no solo, mantendo desativados os sistemas supramencionados.

A última ordem de trabalho da intervenção de manutenção, referente à inspeção da aeronave segundo o regulamento 14 CFR 91.409 (f)(3) foi realizada pelo inspetor responsável. No entanto, este regulamento especifica que a inspeção deve ser de acordo com a recomendação do fabricante, pelo que a inspeção *on condition* dos sensores de posição da perna seria obrigatória. Apesar da ação de inspeção utilizada pela organização de manutenção não referir especificamente a análise dos sensores, os componentes e sistemas adjacentes foram inspecionados sem que fosse detetada a falha dos sensores. Segundo o diretor de qualidade da *West Star Aviation*, o voo de teste pós manutenção seria executado, no entanto a companhia *Evergreen International Aviation, Inc.* recusou o teste e enviou um dos seus mecânicos para efetuar a verificação da aeronave antes do voo de regresso a *Oregon*.

Os fatores que contribuíram para o acidente foram a falha da deteção do problema no decorrer das inspeções de manutenção e o facto de o piloto não ter aplicado a travagem de emergência na altura adequada.

Consequências:

- Danos substanciais na aeronave.
- Deste acidente não foram reportadas quaisquer ações corretivas a nível organizacional.

3.5. Análise estatística dos casos reais

Neste ponto pretende-se fazer uma análise causal de falhas relacionadas com ações de manutenção com o intuito de identificar os fatores mais suscetíveis de ocorrerem, de forma a formular ações corretivas para os prevenir.

Assim sendo, tendo em conta os casos de estudo apresentados anteriormente, cujas causas se encontram de seguida descritas, desenvolveu-se a :

- Caso de estudo 1: Falha de cumprimento de procedimentos operacionais/Falha de manutenção – Instalação incorreta;
- Caso de estudo 2: Falha de cumprimento de procedimentos operacionais/Falha de manutenção – Instalação incorreta;
- Caso de estudo 3: Fatores humanos (Fadiga/Pressão)/Falha de manutenção – Manutenção deficiente;
- Caso de estudo 4: Falha de manutenção – Manutenção deficiente/Política de manutenção deficiente;
- Caso de estudo 5: Falha de cumprimento de procedimentos operacionais/Falha de manutenção – Manutenção deficiente;
- Caso de estudo 6: Falha de cumprimento de procedimentos operacionais/Falha de manutenção – Instalação incorreta;
- Caso de estudo 7: Falha de cumprimento de procedimentos operacionais/Falha de manutenção – Manutenção deficiente.

Tabela 5. Tabela resumo de análise de casos reais em função do fator causal associado à ocorrência (elaborado pelo autor da dissertação)

Caso de estudo	Acidente	Incidente	Tipo de operação	Fator Causal				
				Instalação incorreta	Manutenção deficiente	Política de manutenção deficiente	Fator humano	Falha no cumprimento de procedimentos
1	×		Part 121	×				×
2	×		CAT Carga	×				×
3	×		CAT Passageiros		×		×	
4		×	Part 121		×	×		
5	×		Part 121		×			×
6	×		Part 135	×				×
7	×		Part 91		×			×

Os dados obtidos neste estudo revelam a predominância da falha no cumprimento de procedimentos como o principal fator causal dos acidentes nos LG, com a intervenção da manutenção. Este fator causal apresenta aproximadamente 71% de incidência nas ocorrências analisadas, seguido da manutenção deficiente, aproximadamente 57%. Assim, à semelhança dos dados supra referidos na análise estatística efetuada pela IATA, esta análise evidencia que a falha de procedimentos surge como um dos principais fatores causais associados às ocorrências nos LG, razão pela qual será destacada e analisada adiante neste trabalho.

Dada a complexidade do setor aeronáutico, a investigação de acidentes tem demonstrado ser, de facto, um dos melhores métodos de análise e estudo das diversas formas de transpor as defesas do sistema. A sua contribuição para a melhoria da segurança do transporte aéreo é evidente, dadas as mais valias que advém da sua prática, capacitando a implementação de ações e de medidas corretivas com vista a evitar futuros acidentes.

A ênfase do presente capítulo foi a investigação de acidentes, tendo sido destacado o modelo teórico de *Reason*, efetuado o ponto de situação dos acidentes e incidentes provocados por ações de manutenção nos LG, e finalmente, analisadas 7 ocorrências, acidentes e incidentes, com as referidas características, tendo sido constatadas as causas mais frequentes. Entre elas, o incumprimento de procedimentos revelou ser a causa que apresenta maior frequência, representando assim uma oportunidade de melhoria, merecendo a devida atenção no 7º capítulo deste trabalho, onde será proposta uma medida neste sentido, com o objetivo primordial de minimizar os acidentes e promover a segurança da operação aérea.

Uma vez feita a análise do LG e o estudo de acidentes neste sistema, originados por ações de manutenção, abordar-se-á no seguinte capítulo a aeronavegabilidade, condição que garante a operacionalidade em segurança das aeronaves.

4. Aeronavegabilidade

Neste capítulo será abordado o conceito de aeronavegabilidade, os respetivos requisitos obrigatórios que garantem a aeronavegabilidade de uma aeronave, a designação da entidade certificada responsável pela gestão da aeronavegabilidade, as entidades regulamentadoras e a legislação europeia aplicável a este setor.

4.1. Visão geral do conceito de aeronavegabilidade

Aeronavegabilidade é a condição técnica da aeronave e dos seus componentes, que permite que esta realize a função para a qual foi projetada. Uma aeronave diz-se estar navegável quando está em conformidade com o seu certificado tipo e em condições de realizar um voo seguro. O Certificado de Aeronavegabilidade (CofA), emitido pela entidade aeronáutica onde a aeronave está registada, é o registo que garante esta condição.

Segundo o Regulamento (UE) n.º 1321/2014 - ANEXO I – PART M – SUBPARTE G - Ponto M.A.708, para que uma aeronave se encontre navegável, deve cumprir, ou ter controladas as 6 seguintes condições:

- Programa de manutenção da aeronave (PMA)

O PMA é o manual relativo à manutenção planeada da aeronave e dos seus componentes, sendo elaborado pela entidade de gestão da aeronavegabilidade permanente, “*Continuing airworthiness management Organisation*” (CAMO), reúne as instruções dadas pela autoridade competente e pelos fabricantes (Ex: *Maintenance Planning Document* (MPD), *Maintenance Review Board Report* (MRBR)), e efetua o estudo das tarefas de manutenção obrigatórias a realizar na aeronave, motores/*Auxiliary Power Unit* (APU) e componentes, de forma pormenorizada, incluindo também a sua periodicidade. O PMA de aeronaves a motor complexas, quando se baseia numa lógica de grupo diretor de manutenção ou na monitorização do estado de conservação, deve incluir um programa de fiabilidade.

O PMA deve ser sujeito a avaliações periódicas e a alterações sempre que necessário, sendo que qualquer alteração ao seu conteúdo tem de ser obrigatoriamente aprovada pela autoridade competente ou pela CAMO mediante autorização prévia [23].

– Controlo de componentes

O controlo dos componentes instalados numa aeronave é executado mediante a sua identificação, através do seu *part number* (P/N) e do seu *serial number* (S/N). A gestão dos componentes é efetuada sob 3 processos de manutenção distintos:

- *O/C – On Condition:*

Processo de manutenção preventiva condicionada é caracterizado pela monitorização dos componentes, com a devida periodicidade, segundo as tarefas de manutenção presentes no PMA. A avaliação do desempenho dos equipamentos e dos seus parâmetros de funcionamento define se devem ser removidos ou continuar em serviço. Este processo pretende garantir que o componente não falha enquanto se encontra em serviço [24].

- *C/M – Condition Monitoring:*

Atividade aplicada na manutenção preventiva condicionada preditiva, desempenhada manualmente ou de forma automática, através da recolha de parâmetros de desgaste em tempo real. O tratamento da informação é realizado informaticamente sendo analisados e interpretados parâmetros dos motores, dos sistemas mecânicos, elétricos e dos controlos de voo. Os dados monitorizados são enviados para uma estação de solo onde são processados e são diagnosticadas as falhas, de modo a definir a estratégia de manutenção ótima para uma determinada situação [25].

- *H/T – Hard Time:*

Processo de manutenção preventiva sistemática, cuja degradação do componente é limitada por um tempo específico (tempo de calendário, ciclos de voo/aterragem ou horas de voo), ao fim do qual ocorre uma intervenção de manutenção. As intervenções periódicas incluem serviços regulares de manutenção, revisões gerais – *overhaul*, e revisões condicionadas onde são substituídos componentes de acordo com o PMA. Os componentes substituídos ou recuperados encontram-se na condição de operar durante um novo período de tempo. As peças denominadas *Life Limit Part* (LLP) apresentam um período de vida limitado ao fim do qual é obrigatório que sejam descartadas [24].

– Documentação técnica

A documentação técnica de uma aeronave é vasta, podendo provir das entidades aeronáuticas ou dos fabricantes. Esta contém ações a realizar na aeronave e seus componentes com o objetivo de melhorar a performance e segurança da aeronave e pode ter carácter mandatório, recomendado, informativo e opcional, sendo responsabilidade da CAMO, o seu estudo, controlo e aplicação [26].

As *Airworthiness Directives* (ADs) são atos legislativos de carácter mandatório emitidos pelas entidades aeronáuticas, em resposta a um problema de segurança que pode comprometer a aeronavegabilidade, estabelecendo um objetivo geral a ser alcançado pelos detentores dos CofA [27].

Os SBs são documentos emitidos pelos fabricantes das aeronaves, motores e seus componentes, com modificações que visam a otimização do produto ou da segurança da aeronave e que incluem uma descrição detalhada das tarefas e dos itens alvo [28].

– Controlo de anomalias pendentes

Os *Deferred Defect Items* (DDI) surgem durante a operação da aeronave e representam anomalias para as quais não existe solução imediata, no entanto, a aeronave pode continuar a operar, desde que as mesmas sejam conhecidas, registadas e tenham um prazo de resolução controlado. As anomalias pendentes têm de cumprir os requisitos identificados nos manuais dos fabricantes (Ex: *Minimum Equipment List – MEL*; *Structural Repair Manual – SRM*) ou ser aprovadas por estudos de engenharia da organização, de modo a garantir a aeronavegabilidade da aeronave. O não cumprimento dos requisitos supracitados implica a situação de *aircraft on ground*⁴ (AOG) até que o problema seja resolvido [26].

⁴ Situação de não aeronavegabilidade.

– Controlo de reparações

Os danos estruturais são frequentes ao longo da vida da aeronave e decorrem da sua operação, pelo que são necessárias reparações, que podem ou não, implicar a alteração do projeto inicial da aeronave e dos seus componentes, podendo ainda ser de carácter temporário ou permanente.

Após a deteção de um dano na aeronave, este deve ser avaliado através dos manuais dos fabricantes, nomeadamente o SRM. Se o dano se encontrar coberto pelos manuais, podem existir dois cenários: O dano está fora dos limites pelo que a aeronave não pode operar até à sua reparação; O dano está dentro dos limites pelo que a aeronave pode operar mediante avaliação da criticidade do mesmo.

Quando os danos não constam nos manuais dos fabricantes, é necessário solicitar a assistência dos mesmos ou das *Design Organisation Approval*⁵ – DOA, de maneira a que se proceda ao estudo do dano e à emissão das instruções de reparação [26].

– Controlo de modificações

No decorrer da sua operação, uma aeronave pode ser sujeita a alterações do seu projeto inicial, podendo como tal, sofrer modificações de carácter recomendado, mandatório ou não.

As modificações não mandatórias são usualmente realizadas por conveniência dos operadores ou dos proprietários (Ex: Modificação da configuração da cabine). Por sua vez as modificações mandatórias, de um modo geral, afetam a segurança da aeronave, sendo impostas pelas autoridades competentes, normalmente através de ADs. Por último, as modificações recomendadas visam melhorar a performance da aeronave, não estando diretamente relacionadas com a segurança, sendo emitidas pelas fabricantes através de SBs [26].

A CAMO tem de garantir que as modificações são realizadas através de documentação certificada, emitida pelo fabricante ou por um DOA, e decidir a sua aplicação utilizando um processo de gestão de riscos para a segurança da entidade [22].

⁵ Organização aprovada para realizar o projeto de modificações e a emissão e modificação da documentação necessária.

4.2. Aeronavegabilidade permanente

Ao longo da vida da aeronave é necessário dar continuidade à sua aeronavegabilidade, cumprindo as 6 condições supracitadas, através de um conjunto de processos e tarefas que asseguram as suas condições técnicas, a partir do momento em que é fabricada (aeronavegabilidade inicial) e começa a operar. Estas condições permitem manter o seu CofA e operar de forma segura [22].

A gestão da aeronavegabilidade permanente é estudada por uma das seguintes organizações competentes: Entidade de gestão da aeronavegabilidade permanente; Entidade de aeronavegabilidade combinada, “*Combined airworthiness organisation*” (CAO).

Nas organizações CAMO, a execução das tarefas de manutenção é levada a cabo por entidades de manutenção PART-145, subcontratadas para o serviço, uma vez estas organizações estão dedicadas somente à gestão da continuidade da aeronavegabilidade. As organizações CAO, podem por outro lado executar também as tarefas de manutenção, estando capacitadas para tal, no entanto, apenas podem intervir em aeronaves a motor não complexas.

4.3. CAMO – Entidade de gestão da aeronavegabilidade permanente

A gestão da continuidade da aeronavegabilidade implica a necessidade de recursos humanos, financeiros e ambientais, sendo efetuada por uma organização CAMO, através do desenvolvimento e implementação de políticas e procedimentos documentados. Esta organização está encarregue de garantir que a aeronave está tecnicamente apta para ser operada em segurança.

Os deveres desta entidade para com os proprietários das aeronaves são [23]:

- Assegurar que o tipo de aeronave em questão se encontra descrito no âmbito da sua certificação;
- Desenvolver e aprovar o PMA da aeronave, fornecendo ao proprietário uma cópia do mesmo e justificações de eventuais desvios às recomendações do titular de aprovação do projeto (DAH);
- Organizar uma inspeção de transição utilizando o prévio PMA da aeronave;

- Assegurar que toda a manutenção é efetuada por entidades certificadas ou por pessoal de certificação independente;
- Assegurar o cumprimento de todas as ADs aplicáveis;
- Garantir a reparação de todas as deficiências detetadas durante as operações de manutenção, ou comunicadas pelo proprietário;
- Efetuar a gestão da manutenção de rotina, a aplicação de ADs e a substituição e inspeção dos componentes da aeronave;
- Comunicar ao proprietário sempre que a aeronave deva ser encaminhada para uma entidade de manutenção ou, se autorizado, para pessoal de certificação independente;
- Efetuar a gestão e o arquivo de toda a documentação técnica;
- Efetuar a gestão dos processos de aprovação prévia referentes a quaisquer reparações ou modificações a realizar na aeronave;
- Comunicar à autoridade competente sempre que o contrato celebrado com o proprietário não seja cumprido e sempre que a aeronave não seja apresentada pelo mesmo para realizar a manutenção;
- Assegurar a execução da avaliação da aeronavegabilidade da aeronave e garantir a emissão do respetivo certificado, transmitindo-o à autoridade competente;
- Comunicar todas as ocorrências, em conformidade com o previsto na regulamentação aplicável;
- Notificar à autoridade competente do Estado-Membro de matrícula, qualquer denúncia do contrato celebrado.

Segundo a regulamentação europeia, qualquer detentor de um Certificado de Operador Aéreo (COA) ou qualquer proprietário de aeronaves a motor complexas, necessita obrigatoriamente de ser gerido por uma organização CAMO, ou seja, ter um departamento responsável pela gestão da aeronavegabilidade permanente [23].

4.4. Entidades regulamentadoras

As entidades regulamentadoras asseguram a segurança da aviação civil, representando um papel de elevada importância, através da regulamentação, fiscalização e certificação deste setor. As entidades regulamentadoras competentes, no que diz respeito a Portugal, inserido no espaço aéreo europeu, são a *International Civil Aviation Organization* (ICAO) num ponto de vista global, a *The European Authority for Aviation Safety* (EASA) a nível europeu e por fim a Autoridade Nacional da Aviação Civil (ANAC) que atua a nível nacional.

4.4.1. Internacional Civil Aviation Organization (ICAO)

A ICAO é uma agência especializada da Organização das Nações Unidas (ONU), para administrar a Convenção de Chicago, estabelecida em 1944, pelos seus 193 Estados-membros.

A *Convention on International Civil Aviation*, geralmente designada por Convenção de Chicago, é um tratado internacional que estabelece os princípios fundamentais que possibilitam o transporte aéreo internacional de forma segura e equitativa, de forma a preservar a paz e a promover a cooperação entre os Estados-membros [29].

A ICAO estabelece regras internacionais para a segurança, eficiência e desenvolvimento dos serviços aéreos. Esta Organização elabora um conjunto de normas recomendadas para a aviação civil, denominadas por *Standards and Recommended Practices* (SARPs) e de procedimentos para a navegação aérea, designados *Procedures for Air Navigation* (PANS), que são utilizados pelos Estados-membros da ICAO para garantir a conformidade das suas operações e dos regulamentos da aviação civil local com as normas globais [30].

4.4.2. The European Authority for Aviation Safety (EASA)

A EASA é uma agência da EU, criada através do Regulamento (EU) n.º 2018/1139, para a regulamentação da indústria da aviação, estabelecida em 2002 pelo Parlamento Europeu e pelo Conselho da União Europeia, integrando os 27 Estados-membros da EU, a Suíça, a Islândia, a Noruega e o Listenstaine [31].

O seu principal objetivo é promover os mais elevados padrões de segurança e proteção ambiental na aviação civil, contribuindo para a melhoria do desempenho global deste

setor, facilitando a livre circulação e proporcionando condições de igualdade para todos os intervenientes da indústria da aviação, através da cooperação de países terceiros e respetivas entidades aeronáuticas [32].

A EASA assume a responsabilidade de implementação e monitorização de regras de segurança, certificação de aeronaves e componentes, aprovação das organizações envolvidas na indústria aeronáutica e de consultoria especializada para a elaboração de nova legislação [31].

4.4.3. Autoridade Nacional da Aviação Civil (ANAC)

A ANAC é a autoridade nacional responsável por assegurar que as normas europeias e mundiais da aviação civil são cumpridas no espaço aéreo português, através do exercício de funções de regulamentação, supervisão e fiscalização, colaborando com o Governo para a preparação de regulamentos, circulares técnicas e diretivas.

A ANAC tem autoridade para “licenciar, certificar, autorizar e homologar as atividades e os procedimentos, as entidades, o pessoal, as aeronaves, as infraestruturas, equipamentos, sistemas e demais meios afetos à aviação civil, bem como definir os requisitos e pressupostos técnicos subjacentes à emissão dos respetivos atos” [33].

O controlo da aeronavegabilidade é, portanto, uma prática indispensável para a segurança no transporte aéreo, garantindo a condição técnica da aeronave e dos seus componentes durante a vida útil da mesma.

O presente capítulo incidiu sobre a aeronavegabilidade e os aspetos que relacionam o estado físico e legal de uma aeronave, assim como as respetivas condições obrigatórias que devem ser cumpridas e controladas. Foram também objeto de estudo, as organizações responsáveis por garantir a execução destas condições, bem como as entidades regulamentadoras que asseguram, através a legislação, fiscalização e certificação, a segurança da aviação civil nacional.

O capítulo seguinte diz respeito à manutenção aeronáutica, que procura manter ou repor a eficiência e a condição técnica das aeronaves através da execução de um vasto conjunto de tarefas e operações, desempenhando deste modo um papel crucial na operação e na segurança da atividade aeronáutica.

5. Manutenção aeronáutica

A segurança aeronáutica depende consideravelmente dos processos de manutenção para manter as aeronaves numa condição segura de navegabilidade, através da reparação da deterioração causada pelos ciclos de voo.

Como foi visto anteriormente, a gestão da manutenção em aeronaves a motor complexas, destinadas ao transporte aéreo comercial, é da responsabilidade das organizações CAMO, através do PMA. No entanto, a manutenção em si engloba um vasto número de conceitos e definições, métodos e operações, que irão ser tratadas neste capítulo. Será feita também uma breve nota histórica desde o surgimento dos programas de manutenção, até ao modelo que vigora atualmente.

5.1. Conceitos e definições

A manutenção pode assumir diversas metodologias, parâmetros e operações, no entanto, numa primeira instância, é fundamental precisar a sua definição.

Procurando inicialmente abordar o conceito de manutenção num âmbito geral, é possível verificar através das seguintes normas, que caracterizam a terminologia de manutenção, que a manutenção é estabelecida da seguinte forma:

A Norma Europeia para a terminologia de manutenção, [34] define a manutenção como a “combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou a repô-lo num estado em que possa desempenhar a função requerida”.

Segundo a Norma BS 3811:1984, [35] a manutenção é definida como sendo a “combinação de ações realizadas para manter um bem, ou repô-lo numa condição capaz de desempenhar a função para a qual foi projetado”.

A Comissão Europeia no âmbito do Regulamento EU, [22] relativo à aeronavegabilidade permanente das aeronaves e dos seus componentes, define a manutenção como “qualquer revisão, reparação, inspeção, substituição, modificação ou retificação de avarias, bem como qualquer combinação destas operações, executada numa aeronave ou num componente da aeronave, à exceção da inspeção pré-voo”.

Podemos desta forma reconhecer que a manutenção é uma função que tem como objetivo manter ou repor um equipamento, a um nível de eficiência e condições de segurança apropriada para o qual foi projetado, através de um vasto conjunto de operações.

A par do conceito de manutenção, considera-se de igual forma importante, listar alguns dos termos mais relevantes no contexto do presente capítulo [22]:

- Bem: Peça, componente, aparelho, subsistema, unidade funcional, equipamento ou sistema que pode ser considerado individualmente. Nota: No decorrer do presente capítulo os termos “equipamento”, “componente”, “órgão” e “unidade” serão empregues de forma equiparável ao termo “bem”.
- Falha ou avaria: Cessação da aptidão de um bem de realizar a sua função específica.
- Peça sobresselente: Bem destinado a substituir um bem correspondente, de modo a repor a sua função original. Também designado por rotável, é qualquer unidade que possa ser reparada após avaria, suscetível de poder efetuar um ciclo entre o equipamento em que está instalada, a oficina onde é feita a sua reparação e ensaio, o armazém onde é armazenada e um equipamento em que seja novamente instalada. Um rotável é caracterizado por P/N, atribuído pelo fabricante para identificar exclusivamente o projeto específico de uma peça ou conjunto de peças, e por um S/N que identifica uma unidade específica dentro de cada P/N, correspondendo geralmente ao número sequencial de produção [36].
- Potencial: Período de vida útil de um determinado sistema ou componente [36].

5.2. Métodos de manutenção

São diversas as classificações e categorias aplicáveis no ramo da manutenção, que apresentam várias estratégias de atuação. Os seguintes pontos deste capítulo, irão focar os diferentes métodos de manutenção, bem como os parâmetros que originam as respetivas operações de manutenção, *vide* Figura 15.

A primeira distinção que se faz, entre manutenção não planeada e planeada, não constitui efetivamente um método de manutenção, mas sim uma forma de planeamento das operações de manutenção. A norma [35] distingue estas definições da seguinte forma:

- Manutenção não planeada: Manutenção executada sem um planeamento pré-determinado.
- Manutenção planeada: Manutenção organizada e executada com preparação prévia, de acordo com um plano, onde se verifica o controlo do seu progresso e o registo das ações efetuadas.

Relativamente aos métodos de manutenção, apesar de não existir unanimidade na comunidade científica em relação à subdivisão de algumas das suas categorias, podemos assumir que se dividem em manutenção corretiva e preventiva. A manutenção corretiva é função da avaria, e pode ser planeada ou não. A manutenção preventiva, por sua vez, classifica-se em sistemática quando é realizada mediante um prazo (Ex: tempo, ciclos de voo, entre outros), ou condicionada quando a ação de manutenção é função do estado do componente.

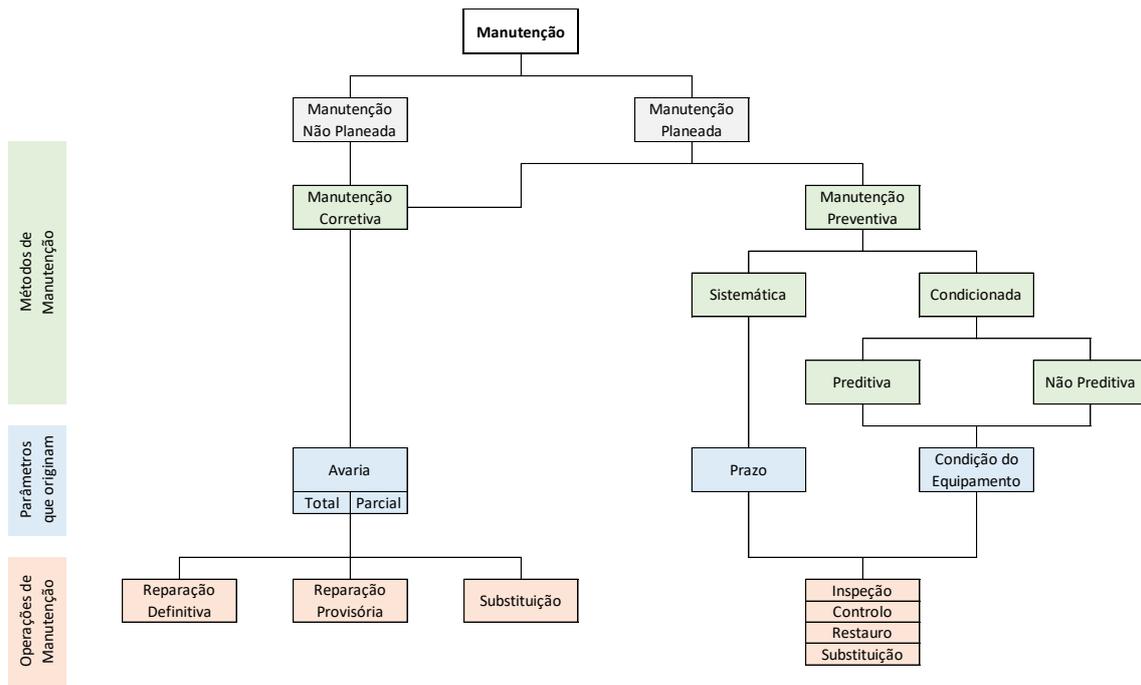


Fig. 15. Manutenção - Visão geral⁶ (elaborado pelo autor da dissertação)

5.2.1. Manutenção corretiva

Este método de manutenção, tal como o próprio nome indica, é efetuado após a deteção da avaria do equipamento e tem como finalidade restabelecer o seu estado funcional, de modo a que possa desempenhar a sua função. A avaria por sua vez, pode ser total, quando ocorre a interrupção da operação do equipamento, ou parcial, se existir apenas uma alteração à capacidade de realização da sua função [36].

Segundo a Norma EN 13306/2017, [34] a manutenção corretiva pode ser diferida, quando a avaria não é crítica, e pode portanto ser adiada para a altura mais conveniente, ou ser executada imediatamente após a deteção da avaria, quando se tratam de bens críticos ou quando a falha representa consequências ambientais ou de segurança inadmissíveis.

A manutenção corretiva imediata deve ser iniciada o quanto antes, para reparar o componente, e devolvê-lo ao seu estado funcional, de forma a evitar o agravamento de potenciais danos, ferimentos, ou fatalidades, prevenindo danos ambientais ou elevados custos inerentes à perda de produção. Por outro lado, quando a avaria não é crítica, a

⁶ Esquema ilustrativo dos diferentes métodos de manutenção adaptado da Norma Europeia EN 13306/2017.

intervenção de manutenção pode ser adiada para uma altura mais oportuna, evitando a alocação de recursos de forma desnecessária [37].

5.2.2. Manutenção preventiva

A manutenção preventiva tem como missão a mitigação da degradação de um componente e a redução da sua probabilidade de falha, através de intervenções com intervalos de execução pré-determinados ou em função do estado do componente [35]. Por outras palavras, pode dizer-se que a manutenção preventiva tem como objetivo evitar que as avarias de equipamentos que se encontrem a funcionar ocorram, desde que financeiramente e em termos de segurança seja mais favorável do que deixar que a avaria ocorra.

Desta forma, este método de manutenção procura prevenir as causas de acidentes graves, aumentar o tempo de vida dos componentes, mitigar a deterioração do desempenho dos equipamentos, diminuindo os custos de manutenção e procurando evitar as intervenções de manutenção corretiva.

Conforme referido anteriormente, este método de manutenção subdivide-se em dois tipos, que definem a forma de aplicação da manutenção: A manutenção sistemática e a manutenção condicional.

5.2.2.1. Manutenção preventiva sistemática

A manutenção preventiva sistemática, também conhecida por *hard time maintenance* como foi enunciada anteriormente, é um método de manutenção que se efetua periodicamente, de acordo com um intervalo estabelecido, de tempo ou de utilização.

Os intervalos de tempo têm as 3 seguintes subcategorias [37]:

- Tempo de funcionamento (idade do equipamento)

As ações de manutenção são executadas em função da idade do equipamento. Quando este começa a operar, define-se o “relógio” a zero de modo a controlar o seu período de funcionamento e estipular os intervalos de manutenção.

- Tempo de calendário

Nesta subcategoria, a programação das ações de manutenção é fixa, sendo baseada num período de calendário estabelecido. Um exemplo de utilização deste tipo de manutenção é em conjuntos de equipamentos idênticos onde se efetua uma substituição em bloco.

- Tempo de utilização

O tempo de utilização é outro parâmetro onde apenas se considera o período em que o equipamento está em uso, sendo apropriado para sistemas em utilização contínua ou intermitente, como por exemplo em linhas de produção, ou no setor dos transportes, onde é possível estabelecer diversas unidades de medida, como o número de ciclos efetuados, a distância percorrida, a quantidade produzida, entre outros [37].

Na manutenção aeronáutica, os intervalos de controlo da aeronavegabilidade permanente mais frequentes são os seguintes:

- Ciclos de voo (CY – *Flight cycles*)
- Horas de voo (FH – *Flight hours*)
- Tempo de calendário (DY – *Daily*; WK – *Weekly*; MO – *Monthly*; YE – *Years*)
- Aterragens (LD)

Estes intervalos são obtidos com base estatística, através do conhecimento da lei de degradação dos equipamentos, dos seus modos de falha e do tempo médio entre avarias (MTBF). Estes parâmetros permitem definir um potencial, em que o desempenho dos equipamentos é considerado aceitável mediante as suas características de projeto, a partir do qual se definem os intervalos de manutenção. Uma vez atingido o limite de vida útil, os equipamentos são substituídos ou restaurados, de forma a assegurar as suas condições de funcionamento por um novo ciclo de vida [36].

Um exemplo deste método de manutenção aplicado aos LG é mencionado na Tabela 6, onde os intervalos de manutenção utilizados são horas de voo e tempo de calendário. Nestas situações, onde mais do que um tipo de intervalo está combinado, para a execução da mesma tarefa de manutenção, salienta-se que a mesma é realizada tendo em conta o intervalo cujo termo sucede primeiro ou depois (Ex: *Which occurs first* ou *Which occurs later*) [26].

Tabela 6. Exemplo de tarefas de manutenção com diferentes periodicidades nos LG. Adaptado de [37]

Inspeção após 300 FH ou 1 ano em serviço:
<ul style="list-style-type: none"> • Verificação da pressão de azoto no amortecedor principal
Inspeção após 600 FH:
<ul style="list-style-type: none"> • Inspeção visual dos pontos de articulação • Inspeção de fugas (óleo, gás, etc) • Inspeção do movimento do <i>torque link</i>
Execução após 7 anos ou 5000 CY:
<ul style="list-style-type: none"> • Overhaul do trem de aterragem

5.2.2.2. Manutenção preventiva condicionada

A manutenção preventiva condicionada, ou *on condition*, é um método de manutenção baseado na condição dos equipamentos, através da avaliação e análise das suas condições físicas, cuja deteção de alguma modificação no desempenho dos mesmos, ou de algum parâmetro de funcionamento fora do vulgar, determina a necessidade de uma intervenção, com vista a manter ou repor o seu estado funcional [34].

A avaliação dos equipamentos é executada periodicamente, através de operações de rotina, como inspeções visuais e verificações funcionais, ou através da leitura contínua de instrumentos de medição. A substituição dos componentes é realizada em função da determinação de limites específicos, tolerâncias ou níveis de desgaste, que são definidos no PMA [38]. Este método é aplicável a equipamentos cuja lei de degradação não é previsível, carecendo das tecnologias de medição apropriadas, das ferramentas de análise e do conhecimento dos modos de falha dos equipamentos [37].

Alguns dos parâmetros de medição mais utilizados são a análise vibracional e por ultra-sons, a medição de pressões, temperaturas e níveis de fluídos, a análise de partículas dos lubrificantes, a termografia por infravermelhos, entre outras técnicas não destrutivas [36].

Existem dois métodos distintos de avaliar o estado de um bem: Métodos diretos ou indiretos [37]:

- Os métodos diretos dependem da análise direta do nível de degradação do componente e podem requerer a sua remoção de serviço, para que seja possível analisar o seu estado (Ex: A inspeção de defeitos estruturais numa caldeira).
- Os métodos indiretos envolvem a medição de variáveis através de dispositivos como transdutores⁷ ou sensores⁸. O armazenamento e o tratamento dos dados recolhidos dá origem a um “*output*” que indica o estado do equipamento ou origina uma ação física através de um atuador, para prevenir danos adicionais.

Este método de manutenção permite a diminuição da probabilidade de falha dos equipamentos e a diminuição da eliminação da vida útil remanescente dos componentes. No entanto, tal só é possível através do investimento nas tecnologias de informação (dispositivos para a recolha de dados, suporte informático para a recolha e tratamento de dados, etc.) [37].

Uma vez abordados os dois métodos de manutenção preventiva, coloca-se a questão: Qual é a opção mais adequada, face ao sistema em causa?

Esta escolha baseia-se nas leis de degradação dos equipamentos, possibilitando a seleção do método de manutenção preventiva mais adequado, através da função densidade de probabilidade de falha $f(t)$, que permite determinar a probabilidade de uma avaria ocorrer em função do tempo de funcionamento.

Conforme é ilustrado na Figura 16, a dispersão da curva de frequência da avaria é diferente de equipamento para equipamento. Quando a dispersão é pequena é possível definir um potencial a aplicar, sendo a melhor opção a manutenção preventiva sistemática. Por outro lado, se a dispersão da curva for grande, a lei de degradação é desconhecida, pelo que se devem determinar periodicidades de ensaio para monitorizar e avaliar o estado dos equipamentos, aplicando desta forma a manutenção preventiva condicionada [36].

⁷ Dispositivo que converte energia de entrada em energia de saída e a transmite a outro dispositivo [37].

⁸ Dispositivo de medida que recebe um estímulo físico da grandeza a medir [37].

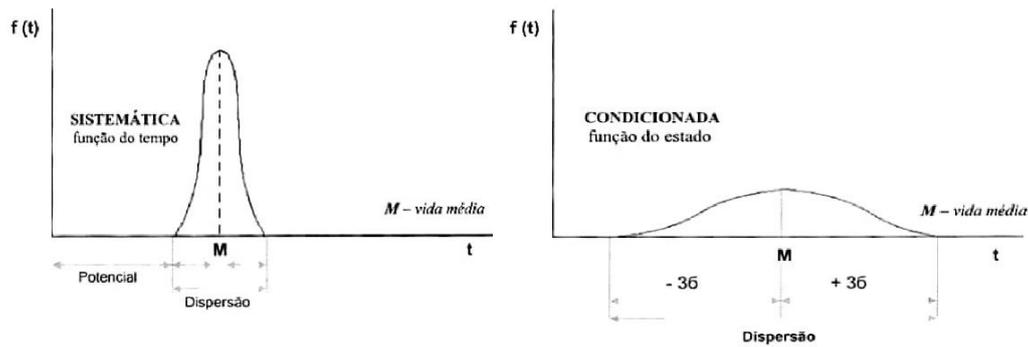


Fig. 16. Exemplos de funções densidade de probabilidade de falha [36]

5.2.2.3. Manutenção preditiva

A manutenção preditiva é um método de manutenção baseado na condição dos equipamentos, que deriva da análise contínua, da identificação e respetiva avaliação de parâmetros significativos associados à degradação dos componentes [34]. O seu objetivo é prever a iminência de uma falha num equipamento, quando são detetadas determinadas condições, proporcionando o agendamento de uma intervenção antes da falha efetivamente ocorrer, procurando desta forma eliminar os custos inerentes a ações corretivas e a execução de intervenções de manutenção preventiva desnecessárias [39].

Este método de manutenção diferencia-se da manutenção preventiva não preditiva na medida em que existe um prognóstico da evolução da degradação, ao contrário desta, que não conta com este tipo de informação [34].

A manutenção preditiva conta com sistemas capazes de formular prognósticos sobre a vida útil dos equipamentos, proporcionando a melhor tomada de decisão relativamente à execução de intervenções de manutenção. A análise de modelos de diferentes cenários de funcionamento dos equipamentos, permite a comparação de indicadores de manutenção, de forma a possibilitar o reconhecimento de problemas antecipadamente, evitando assim falhas inesperadas [40]. Esta análise pode ser realizada recorrendo ao *condition monitoring*, que será detalhado pormenorizadamente no seguinte subcapítulo.

Segundo Kählert, [41] o intervalo de aplicação deste método de manutenção é compreendido entre um estado de condição mínima e um estado nominal, sendo possível começar a detetar possíveis falhas iminentes, conforme se ilustra na Figura 17. Qualquer ação num período demasiado prematuro pode levar a que não se verifiquem falhas, uma

vez que a degradação pode ser impossível de medir e confirmar nesta fase. Por outro lado, ultrapassando o estado de condição mínima do equipamento, torna-se mais propício a ocorrência de falhas, e conseqüentemente operações de manutenção não programadas.

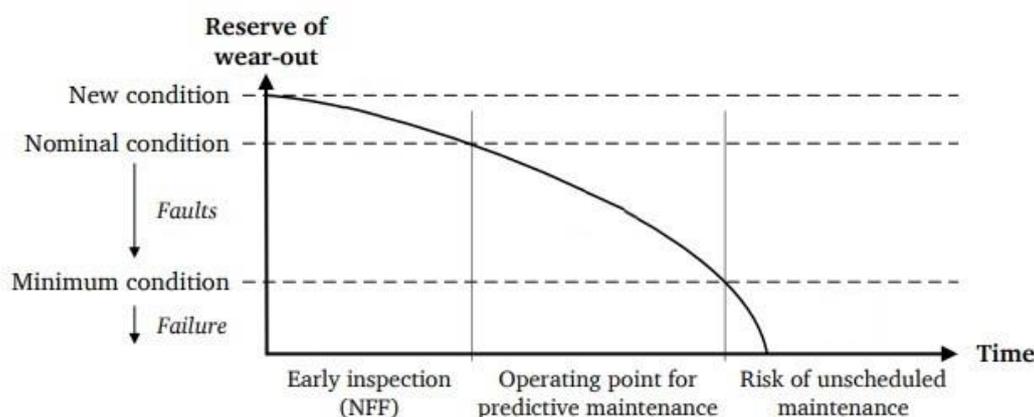


Fig. 17. Aplicação da Manutenção Preditiva relativamente ao desgaste do equipamento. Adaptado de [41]

No entanto, a categorização deste método de manutenção na literatura não é consensual. Para os autores Beebe [42], Ben-Daya et al. [37], Sobral [36] e Figueira [43], ou segundo as Normas BS 3811:1984 [35] e EN 13306/2017 [34], a distinção entre manutenção preventiva condicional e preditiva, ou não é considerada sendo ambas equivalentes, ou classifica-se a manutenção preditiva, uma subcategoria da manutenção preventiva condicional. Segundo Oliveira [44], Domingues [39], Santos [45], Alves [26], ou Fonseca [46], a manutenção preditiva surge como um terceiro método de manutenção, distinta da manutenção preventiva.

5.2.2.4. Condition monitoring

O processo de monitorização da condição, vulgarmente designado por *condition monitoring*, possui enumeras definições, no entanto segundo a Norma EN 13306/2017, [34] é categorizado como uma atividade de manutenção aplicada na manutenção preventiva condicionada preditiva e classificado da seguinte forma:

“Atividade desempenhada de forma manual ou automaticamente, com o intuito de efetuar a medição de características e parâmetros da condição física atual do equipamento, em intervalos pré determinados” [34]. Este processo é contínuo, sendo usualmente realizado no decorrer da operação do equipamento [35].

O *condition monitoring* é utilizado quando não é possível aplicar a manutenção *hard time* ou *condition based*, não sendo um processo de prevenção da falha, mas sim um processo de monitorização do estado do equipamento, através da recolha e da análise de dados do sistema segundo métodos indiretos de medição⁹ [28]. Este processo, não desencadeia nenhuma operação de manutenção, uma vez que os componentes sujeitos à monitorização contínua são substituídos quando a falha ocorre [38].

As aplicações mais adequadas para o *condition monitoring* são em sistemas complexos, tais como equipamentos de comunicação e navegação, iluminação, instrumentos e componentes eletrónicos, onde não é possível prever a ocorrência de falhas através de verificações operacionais ou através da sua substituição. Estes equipamentos não podem constituir um risco direto à segurança da aeronave quando a falha ocorre, pelo que são sistemas redundantes, de modo a garantir a capacidade da aeronave prosseguir o voo e aterrar em segurança [28].

A implementação de um programa de fiabilidade é um requisito para o processo de monitorização da condição, de modo a avaliar estatisticamente os dados recolhidos através dos sistemas de informação a bordo, dos *pilot reports* (PIREP) dos *maintenance reports* (MAREP), das remoções prematuras ou justificadas, das ocorrências (acidentes e incidentes), das não conformidades detetadas nas auditorias, da documentação técnica emitida pelos fabricantes e entidades aeronáuticas, entre outros [26]. Desta forma, os dados recolhidos servem para a revisão de tarefas de manutenção integradas no PMA, manuais, procedimentos, modificações nas aeronaves, no planeamento e agendamento da manutenção, no diagnóstico e resolução de falhas, entre outras [38].

⁹ Ver subcapítulo 5.2.2.2.

5.3. Operações de manutenção

As operações de manutenção que surgem dos diversos métodos de manutenção anteriormente mencionados, são identificadas segundo as seguintes abreviaturas na Tabela 7 [47]:

Tabela 7. Operações de Manutenção – Abreviaturas [47]

ADS	Adjust/Test	OPC	Operational Check
BAT	Replace Battery	OVH	Overhaul
BCK	Bench Check	PRE	Pressure Check/Adjust if necessary
BIT	Bite Test	RED	Read
CHG	Change/Replace	REP	Repair
CHP	Chip Detector Check	RES	Resistance Test
CK	Check	RFL	Drain/Refill
CLN	Clean	R1	Partial Revision I
DRN	Drain	R2	Partial Revision II
D	Day Check	R3	Partial Revision III
DCD	Discard	SCR	Scrap
FC	Functional Check	SDI	Special Detailed Inspection
FLW	Flow Test	SMP	Sample analysis
GVC	General Visual Check	STR	Sterilize
GVI	General Visual Inspection	SVC	Service
INS	Inspection	TES	Test
LKC	Leak Check	TOR	Torque Check
LL	Life Limit	TVC	Thorough Visual Check
LVL	Level Check/Adjust if necessary	WAC	Walk Around Check
NDT	Non Destructive Test		

Considerando as diversas operações de manutenção existentes, destacam-se pela sua relevância e utilização, as seguintes [47]:

- Verificação Operacional (OPC): “Tarefa cujo objetivo é determinar se um equipamento cumpre o seu propósito [28].
- Verificação Funcional (FC): “Verificação quantitativa para determinar se o desempenho de funções dos componentes se encontra dentro de limites específicos. Este tipo de verificação pode requerer a utilização de equipamento adicional” [28].
- Inspeção (INS): “Exame e comparação de um componente face a tolerâncias específicas” [28].

- Inspeção Visual (GVC): “Exame visual de um equipamento para determinar se cumpre a sua função. Trata-se de uma tarefa de verificação de falhas que não requer tolerâncias quantitativas” [28].
- Lubrificação (LU): “Ação de repor óleo, massa, ou outra substância utilizada com o propósito de assegurar as características de projeto, através da redução de fricção ou dissipação de calor” [28].
- Revisão (SVC): “Ação com o intuito de responder às necessidades básicas dos equipamentos e/ou sistemas, com o propósito de manter ou repor as características de projeto” [28].
- Restauro (RST): “Trabalho necessário para a reparação de um equipamento para um padrão especificado. O restauro pode variar desde a limpeza de um bem, até à revisão geral (*overhaul*)” [28].
- Revisão geral (OVH): “Manutenção preventiva com o objetivo de manter um nível de desempenho específico de um equipamento. Este tipo de operação, também designado por *overhaul*, pode requerer a desmontagem parcial ou total do equipamento” [34].
- Abate (DCD): “Remoção de serviço de qualquer bem no seu limite de vida útil (*life limit* – LL)” [28].
- *Walk Around Check* (WAC): “Inspeção rápida realizada por uma equipa de manutenção ou pela tripulação da aeronave, com o objetivo de averiguar possíveis defeitos evidentes” [28].
- Ensaio Não Destrutivo (NDT): “Trata-se de uma inspeção detalhada com o objetivo de detetar anomalias estruturais que emprega técnicas de ensaios não destrutivos, como ultra-sons, magnetoscopia, radiografia industrial, líquidos penetrantes, entre outras” [28].

5.4. Programas de manutenção

5.4.1. Nota histórica

As primeiras estratégias de manutenção, antes da Segunda Guerra Mundial, eram baseadas na experiência dos técnicos, sendo a manutenção corretiva o método aplicado na altura. A simplicidade dos sistemas garantia a sua fiabilidade e permitia a sua fácil manutenção. Após a Segunda Guerra Mundial, em meados da década de 1950, a segunda geração de manutenção começou a ser desenvolvida. A crescente competitividade e complexidade dos sistemas mecânicos e os seus requisitos de desempenho, exigiam maiores tempos de paragem e mais recursos, tornando os custos de manutenção e a disponibilidade dos equipamentos, problemas que até então não existiam. Foi então introduzido o método de manutenção preventiva, que baseado no conceito de que todos os componentes têm um tempo de vida útil, concluiu a necessidade de executar revisões gerais ou de abater os equipamentos, de modo a assegurar a sua fiabilidade e segurança. No entanto, esta abordagem não garantia a diminuição da frequência de todas as falhas num equipamento e constituiu um considerável aumento dos custos de manutenção [48].

Em 1961, a FAA em conjunto com várias companhias aéreas Norte Americanas, formaram uma comissão e desenvolveram um estudo de fiabilidade em resposta ao aumento insustentável dos custos de manutenção, à baixa disponibilidade das aeronaves e à fraca efetividade da tradicional manutenção preventiva sistemática, onde constataram que as revisões gerais periódicas têm baixo efeito na fiabilidade de equipamentos complexos, a não ser que os mesmos tenham um modo de falha dominante, que diversos equipamentos não respondiam de forma eficaz à manutenção planeada e que a natureza intrusiva característica das revisões gerais era a principal causa da falta de fiabilidade [49].

No decorrer da década de 1960, foram realizadas várias investigações que procuraram fundamentar o estudo realizado pela comissão, tendo sido desenvolvido um método de decisão lógica, relativo ao melhor processo de manutenção a utilizar. Em 1968 a *Air Transport Association of America* (ATA) publica esta metodologia com o título “*Handbook: Maintenance Evaluation and Program Development*” que viria a ficar conhecido por MSG-1 [48].

5.4.1.1. MSG-1

Em 1968, a *Boeing*, com a cooperação dos representantes de várias companhias aéreas, dos seus fornecedores, e da FAA, elaboraram o primeiro programa de manutenção, designado por *Maintenance Steering Group 1* (MSG-1), com o objetivo de solucionar os problemas de manutenção existentes [28]. Nessa altura, a *Boeing* introduzia o avião *Boeing 747* e procurava uma abordagem de manutenção diferente da tradicional manutenção preventiva, dada a complexidade da nova aeronave e dos seus sistemas tecnologicamente avançados. Segundo o MSG-1, a seleção e avaliação da estratégia de manutenção e das medidas a tomar para uma dada unidade, ficaram conhecidas por análise “*bottom-up*” ou “*process-oriented maintenance*”, sendo a partir de um componente que se desenvolvia a árvore de decisão lógica que permitia concluir o método de manutenção a utilizar. O MSG-1 introduziu os métodos de manutenção preventiva sistemática “*hard time*” e condicionada “*on condition*” e o processo de monitorização da condição “*condition monitoring*” [48].

5.4.1.2. MSG-2

A eficácia da metodologia sistemática do MSG-1 aplicado ao *Boeing 747*, justificava a sua aplicação generalizada a outras aeronaves, pelo que em 1970 foi publicado um novo documento, com o título *Airline/Manufacturer Maintenance Program Planning Document* (MSG-2). O seu objetivo era desenvolver planos de manutenção programada para qualquer aeronave, que assegurassem a segurança e fiabilidade máximas de um determinado componente, ao menor custo [48]. Foi inicialmente aplicado nas aeronaves *Lockheed L-1011* e *McDonnell-Douglas DC-10* tendo sido desenvolvidos os seus programas de manutenção. Foi adotado na Europa em 1972, tendo sido sujeito a ligeiras modificações ficando conhecido por EMSG [28].

5.4.1.3. MSG-3

Em 1978, o Departamento da Defesa dos Estados Unidos solicitou à companhia aérea *United Airlines*, a elaboração de um estudo sobre o aumento da eficiência dos programas de manutenção, com o objetivo de otimizar a disponibilidade das aeronaves e a gestão dos custos. Deste estudo, realizado por *Stanley Nowlan* e *Howard Heap* resultou um relatório denominado “*Reliability-Centered Maintenance*” (RCM), no qual se baseia o MSG-3, publicado em 1980. Até então este documento sofreu 13 revisões, estando

atualmente em vigor a revisão 2018.1. A filosofia deste programa de planeamento de manutenção assenta em diagramas lógicos desenvolvidos em função da consequência das falhas, através dos quais se atribuem tarefas de manutenção. Deste modo a análise de falha dos sistemas da aeronave é controlada ao mais alto nível, razão pela qual esta abordagem é designada “*top-down*” ou “*task-oriented*”. Foram definidas 3 categorias de tarefas de manutenção a ter em conta (Análise de Sistemas/Motores; Análise Estrutural e a Análise Zonal), sendo executadas periodicamente de forma a prevenir as falhas e manter o nível de fiabilidade da aeronave [28].

5.4.2. Programa de manutenção da aeronave (PMA)

O PMA segue a abordagem do MSG-3, e consiste num documento específico e obrigatório para cada aeronave, que define as políticas e metodologias de manutenção, bem como as ações de manutenção a realizar na aeronave, nos seus sistemas e componentes e a respetiva periodicidade. O tipo de operação, as recomendações dos fabricantes e as experiências operacionais são alguns dos fatores que influenciam o desenvolvimento do PMA [50].

Segundo Kinnison, [28] os objetivos do PMA identificados pela ATA são os seguintes:

- “Assegurar os níveis de fiabilidade e segurança dos equipamentos”.
- “Restaurar os níveis de segurança e fiabilidade quando a degradação ocorrer”.
- “Obter a informação necessária para otimizar o projeto de componentes cuja fiabilidade não seja adequada”.
- “Assegurar a concretização destes objetivos a um custo mínimo”.

O PMA, não sendo um documento definitivo, é sujeito a um processo de melhoria contínua ao longo do tempo, de forma a garantir o seu aperfeiçoamento constante face às experiências operacionais, instruções da entidade competente e novas tarefas de manutenção. Desta forma, é submetido a avaliações periódicas por parte das autoridades competentes [22].

O *Maintenance Planning Document* (MPD) é elaborado pelo fabricante da aeronave e tem como principal objetivo fornecer a informação necessária para que os operadores das aeronaves e as organizações de gestão da aeronavegabilidade permanente possam desenvolver e estabelecer um PMA individualizado para cada aeronave. Este documento proporciona uma orientação geral para estas entidades, facultando a lista de tarefas de manutenção exigidas pelas autoridades regulamentadoras além de outras recomendações sugeridas pelo fabricante [47].

Neste capítulo foram salientados aspetos fundamentais da manutenção, tais como as suas diferentes metodologias e operações, as inúmeras definições que apresenta na literatura, alguns dos termos mais frequentemente utilizados, e por fim a evolução dos programas de manutenção que deram origem ao atual PMA.

No seguinte capítulo dar-se-á continuidade à temática da manutenção aeronáutica, através da análise das novas tecnologias de informação, procurando analisar a sua evolução e as possíveis vantagens a nível de segurança que as mesmas oferecem.

6. Tecnologias de informação na manutenção aeronáutica

A evolução da complexidade dos produtos assim como a sua informatização, tem levado à necessidade de novas e melhores competências dos técnicos de manutenção de aeronaves (TMA) e de uma maior quantidade de informação necessária para o desempenho das suas atividades.

Neste capítulo serão abordadas as mais recentes tecnologias de informação aliadas à manutenção aeronáutica, em particular a realidade aumentada, e analisar o seu impacto na promoção da segurança deste setor. Em primeiro lugar, será efetuada uma breve introdução sobre a revolução industrial e a sua evolução ao longo dos últimos 4 séculos. De seguida, será detalhada a quarta revolução industrial, e enumeradas as 9 principais tecnologias consideradas os pilares da indústria 4.0. Por último, será abordada com maior detalhe a realidade aumentada, uma das 9 tecnologias supracitadas, foco deste capítulo.

6.1. A revolução industrial

A revolução industrial teve início em 1784, com o desenvolvimento do primeiro tear mecânico, sendo marcada pela introdução dos equipamentos mecânicos movidos através de vapor e de energia hidráulica. Seguiu-se a segunda revolução industrial, em 1870, com a evolução da produção em massa, através da energia elétrica. Em 1969 teve início a terceira revolução industrial, com a utilização da eletrónica e das tecnologias de informação para alcançar a automatização dos processos de produção, com a substituição substancial da mão-de-obra pelas máquinas [51]. A quarta revolução industrial, frequentemente designada por Indústria 4.0, foi apresentada em 2011 na *Hannover Fair*, uma das maiores feiras mundiais da indústria, com o apoio do governo Alemão [52]. Esta, baseia-se na digitalização e integração dos ativos físicos em ecossistemas digitais. Mais recentemente, surgiu a quinta revolução industrial, identificada por Indústria 5.0, intimamente ligada com o conceito Japonês de Sociedade 5.0 [53]. A Indústria 5.0 pressupõe que as organizações devem orientar as premissas da i4.0 em torno das pessoas, focando deste modo na humanização da utilização das novas tecnologias, enquadrando objetivos sociais e ambientais que vão para além dos lucros e da manutenção de empregos [54].

A Figura 18 resume a evolução da revolução industrial ao longo do tempo assim como os principais marcos históricos.

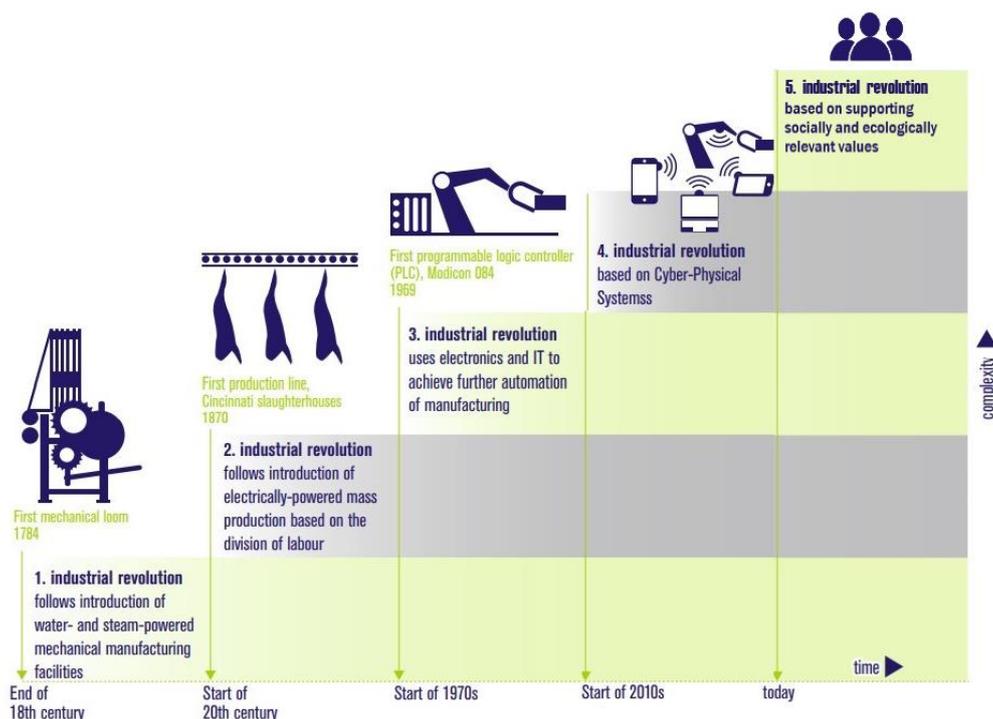


Fig. 18. As cinco fases da Revolução Industrial. Adaptado de [55]

6.2. Indústria 4.0

A i4.0 apresenta uma nova perspetiva na produção industrial, através de um conjunto de tecnologias digitais que contribuem para maximizar os resultados com a mínima utilização de recursos. O resultado desta união é o desenvolvimento de fábricas inteligentes, altamente eficientes na utilização dos recursos e facilmente adaptáveis à realidade das empresas e aos seus objetivos [56].

6.2.1. Tecnologias de informação

O conceito de tecnologia de informação (TI) engloba a utilização de *hardware* e *software*, de sistemas de informação e gestão de dados, telecomunicações, automação e recursos multimédia, para proporcionar a aquisição, o processamento e a transmissão de informações nas organizações [57], [58].

A ascensão da i4.0 deve-se aos avanços nas suas 9 tecnologias fundamentais, elencadas por Rüßmann et al., [59] ilustradas na Figura 19:

- Internet das coisas

A *Internet of things* (IoT) é um novo paradigma de tecnologia que permite a interação, a comunicação, a recolha e partilha de dados entre as pessoas, os dispositivos, ou outros objetos (“coisas”), através do uso de redes de telecomunicações *wireless* [60], [59].

- *Big data analytics*

A *Big data analytics* (BDA) surge com o elevado volume e a diversidade de dados produzidos pelas várias tecnologias da i4.0. Esta tecnologia recolhe, armazena e analisa estes dados de forma a proporcionar uma tomada de decisão em tempo real, garantido a otimização da qualidade dos processos de produção, o desempenho dos equipamentos e a poupança de energia [59], [46].

- Computação em nuvem

A computação em nuvem, ou na “*Cloud*” permite a interligação dos dispositivos, serviços, dados e pessoas na *internet*, proporcionando a otimização da partilha de dados, do desempenho dos sistemas e a redução dos custos. Esta tecnologia assegura o controlo e o *feedback* das fábricas inteligentes maximizando o potencial da indústria de produção [56].

- Cibersegurança

A crescente conectividade dos sistemas e protocolos de comunicação que surgiram com a i4.0, deu origem à necessidade de proteger os sistemas industriais de ataques às informações e dados das organizações. A cibersegurança consiste na proteção do ambiente cibernético, garantindo a confidencialidade, integridade e disponibilidade dos dados [60], [59].

- Integração de sistemas

A coesão entre organizações, departamentos, processos e recursos, através da integração interempresarial de sistemas, capacita a automação das cadeias de valor, articulando produtos, infraestruturas, fabricantes, clientes e fornecedores [60], [59].

- Simulação

A simulação permite a visualização e a transposição de dados do mundo real, num modelo virtual, permitindo desenvolver métodos de validação de produtos, processos ou sistemas. Através da simulação é possível testar e otimizar os sistemas antes da implementação de alterações físicas, possibilitando a diminuição do tempo de projeto dos produtos e o aumento da sua qualidade [56], [60].

- Realidade aumentada

A RA é uma tecnologia que, através da simulação computacional, imerge os utilizadores num ambiente programado e simula a sensação de realidade visual, auditiva e tátil [60]. De uma forma mais simples, a RA fornece informação aos utilizadores, diretamente na zona de trabalho, em tempo real e combinando objetos reais, proporcionando orientação em tarefas novas ou pouco familiares [56].

Esta tecnologia irá ser abordada com maior detalhe nos seguintes pontos deste trabalho, uma vez que é o foco da proposta de intervenção que será apresentada.

- Robôs autónomos

Tradicionalmente, a utilização de robôs em várias indústrias está associada à sua operação isolada, em espaços de produção confinados e sem a perceção espacial do que os rodeia, onde executam tarefas complexas e iterativas. No entanto, a evolução científica tem ditado o avanço desta tecnologia, visando a interação entre os humanos e os robôs, e dos robôs entre si [61]. A utilização da inteligência artificial ¹⁰(IA) nos mais recentes robôs concede-lhes uma excelente variedade de capacidades podendo desempenhar a

¹⁰ Área de estudo dedicada à forma como os computadores podem ser construídos para copiar a forma humana de pensar [85].

maioria dos processos numa fábrica inteligente devido à sua flexibilidade e adaptabilidade [56].

- Impressão 3D

A impressão 3D, ou o fabrico aditivo, é um processo de união de materiais para desenvolver objetos a partir de dados de modelos tridimensionais (3D), geralmente camada a camada [62]. O fabrico aditivo é amplamente utilizado em protótipos e na produção de componentes individuais. Com a i4.0, esta tecnologia visa a produção de pequenos lotes de produtos customizáveis e oferece a liberdade de *design*, com a capacidade de fabrico de geometrias complexas e de *designs* de baixo peso e a potencial eliminação das etapas e ferramentas dos processos de fabrico convencionais. Estas características potenciam a redução dos tempos de produção, do desperdício de matéria-prima, das distâncias de transporte e das quantidades de *stock* disponível [56].

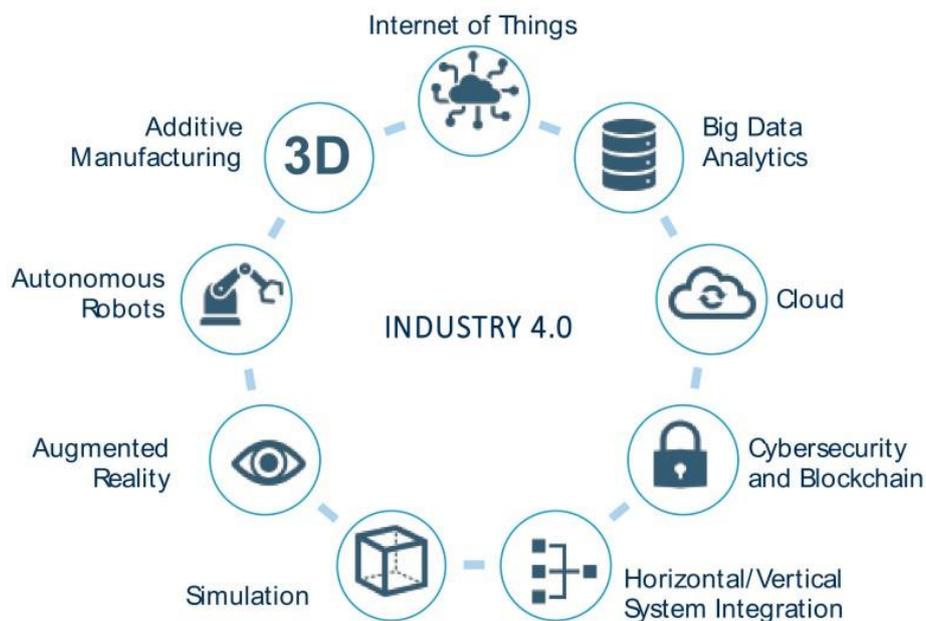


Fig. 19. As nove tecnologias digitais que suportam a Indústria 4.0 [60]

6.3. Realidade mista

De forma a entender o conceito de realidade aumentada, é importante definir e contextualizar o campo tecnológico em que se insere. A realidade mista (RM) é a tecnologia que compreende a realidade virtual (RV) e a RA e que agrega o mundo físico com o mundo digital, onde coexiste a realidade entre o ambiente real e o virtual, conforme exemplifica a Figura 20 [63].

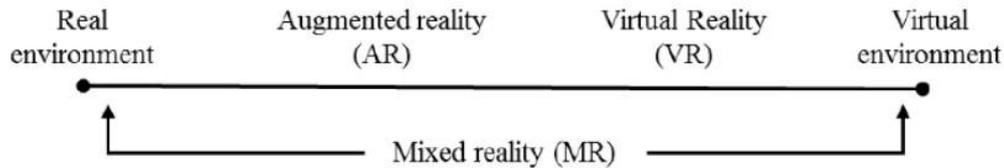


Fig. 20. Realidade Mista, Realidade Aumentada e Realidade Virtual [63]

Segundo Eschen et al., [63] o potencial de utilização das tecnologias da RM, pode ser classificado de acordo com grau de realidade que asseguram e o nível de virtualidade que os seus *displays* apresentam, em função dos seguintes três grupos: o objeto, o modelo e o humano. Os objetos são todos os recursos do mundo físico, como as peças, as ferramentas e o ambiente. O modelo compreende todos os recursos virtuais. Por último, o humano é o utilizador a ser apoiado pelo sistema.

O potencial da RA aumenta com a necessidade de interação entre o humano e o objeto, enquanto que a RV tem maior potencial em aplicações onde a interação entre o humano e o modelo é superior.

A diferença entre estas tecnologias centra-se no ambiente que proporcionam aos utilizadores. Na RV o utilizador tem contacto com um ambiente completamente virtual, usualmente denominado mundo virtual, que pode simular a realidade ou ser fictício [64]. A RA por sua vez, é uma variação da RV, que ao contrário de substituir a realidade, é utilizada como um suplemento desta, permitindo aos utilizadores visualizar o mundo real enquanto interagem com informações virtuais [65].

6.4. Realidade aumentada

6.4.1. Nota histórica

O conceito da RA remonta à época da 2ª Guerra Mundial, quando as forças armadas Britânicas no projeto “*Mark VIII Airborne Interception Radar Gunsighting*”, desenvolveram uma tecnologia que permitia a exibição da informação do radar no pára-brisas de um avião de guerra. Desde então a aplicação da RA tem sido estudada e implementada nos mais diversos setores, nomeadamente, na medicina, cinematografia, entretenimento, sistemas de navegação, turismo, marketing, entre outros.

O termo “augmented reality” surgiu no início dos anos 90, quando *Thomas Caudell* e *David Mizell*, desenvolveram um *head-mounted display* (HMD) para auxiliar os técnicos da *Boeing* na instalação elétrica das aeronaves [66], [67].

6.4.2. Definição

Segundo *Caudell* e *Mizell*, a RA é “uma tecnologia utilizada para aumentar o campo de visão do utilizador, com informação necessária para o desempenho de uma tarefa” [67]. Por outras palavras, este sistema complementa a visão do mundo real com objetos virtuais interativos, em tempo real.

6.4.3. Classificações

Segundo Kirner et al., [68] a RA apresenta duas classificações que dependem da forma como o utilizador visualiza os elementos reais e virtuais: Visão direta (imersiva) ou a visão indireta (não imersiva).

– Visão direta:

Quando o utilizador olha diretamente para as posições reais dos objetos e visualiza o mundo real e a informação virtual, através de projeções virtuais nos olhos ou no cenário real, a RA classifica-se de visão direta. Esta, pode ser implementada através de capacetes óticos, capacetes com microcâmara acoplada, visualizadores de apontamento direto “*handheld*” ou projeções de objetos em ambiente real [68].

– Visão indireta:

A visão indireta é caracterizada pela visualização do cenário real aumentado¹¹ através de um dispositivo, como um monitor, projetor, ou ecrã móvel, não alinhado com as posições reais dos objetos. As imagens reais e virtuais são captadas por câmaras, misturadas em vídeo e disponibilizadas ao utilizador, que partilha o foco do seu campo visual entre o dispositivo de visualização e o cenário real [68].

6.4.4. Sistema de RA

A estrutura típica de um sistema de RA é dividida em 5 módulos [69]:

– Sistema informático para executar o sistema de RA

O sistema informático tem de garantir a potência de processamento necessária para que as necessidades do sistema de RA sejam supridas. Deste modo, deve garantir a execução em tempo real do processamento gráfico 3D, do tratamento de vídeo e apresentação de imagens misturadas, da renderização sensorial, incorporando os elementos visuais, auditivos e hápticos, da execução do rastreamento dos objetos, entre outras [68].

– Captura de vídeo

A recolha de vídeo é feita através de várias câmaras que capturam o enquadramento do local de trabalho e dos objetos. A utilização de câmaras estereoscópicas e de câmaras com sensores de profundidade permitem o desenvolvimento de cenários 3D, podendo ser colocadas na cabeça do utilizador, proporcionando uma visão em primeira pessoa, atrás ou à frente do mesmo [70], [68].

– Sistema de rastreamento

O sistema de rastreamento permite fazer o posicionamento e o ajuste de objetos estáticos e móveis e dos movimentos dos utilizadores, de forma a interligar o cenário

¹¹ Cenário real com a sobreposição de informação virtual.

real com o virtual, através da resposta de sensores ou sistemas de deteção visual para refletir a posição dos objetos [70].

Os marcadores utilizados como método de rastreamento, funcionam como identificadores, que permitem determinar computacionalmente a posição da câmara e a sua orientação, de modo a que o sistema possa sobrepor objetos virtuais sobre os mesmos [68]. As desvantagens deste método são a necessidade de calibração do equipamento de RA para cada marcador utilizado e o facto dos marcadores poderem ocultar áreas importantes dos equipamentos, ou serem obstruídos pelo corpo do utilizador, ferramentas, ou outros objetos no local de trabalho [71].

O rastreamento pode também ser executado sem o recurso a marcadores, através das características naturais da cena real, tais como as arestas ou texturas que permitem o posicionamento dos objetos virtuais [71], dependendo de ferramentas de localização e medição, tais como o *Global Positioning System* (GPS), velocímetros e acelerómetros [72]. A Figura 21 exemplifica estes métodos de rastreamento.



Fig. 21. Exemplos dos métodos de rastreamento¹². Adaptado de [72]

– Dispositivos de saída de dados

Atualmente os principais dispositivos de apresentação de informação são os dispositivos visuais, nomeadamente os capacetes e óculos de visão ótica direta e os dispositivos de visão indireta [68].

Os capacetes de visão ótica direta são constituídos por um dispositivo semitransparente que permite a visualização do mundo real e a reflexão da informação

¹² A imagem à esquerda ilustra o método de rastreio baseado em marcador enquanto a imagem da direita ilustra o método sem marcador.

virtual, projetada pelo capacete. Os capacetes de visão direta por vídeo permitem visualizar o cenário real aumentado, através de uma minicâmara apontada na direção do campo de visão do utilizador. A imagem capturada é misturada com os objetos virtuais e transmitida ao utilizador através do capacete [68]. A distinção destes sistemas de visão direta é demonstrada na Figura 22.

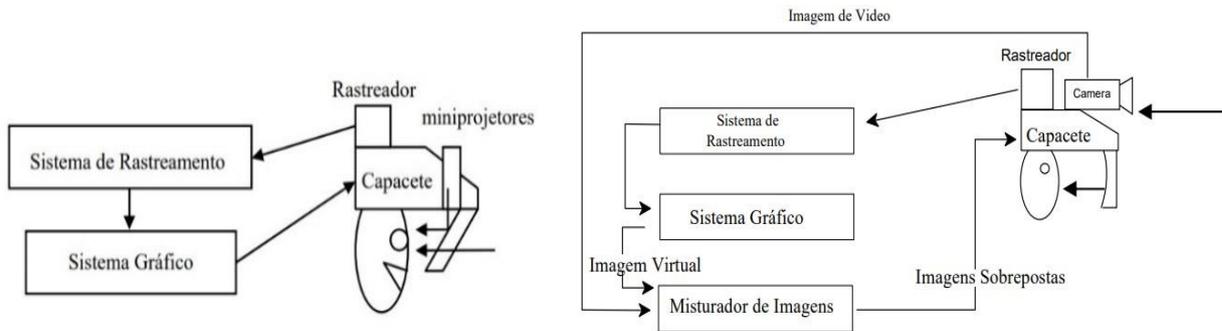


Fig. 22. Capacete com visão ótica direta¹³ [68]

Os dispositivos de visão indireta englobam os projetores e os monitores, tais como os ecrãs móveis, *tablets*, *smartphones* ou *laptops*, e os ecrãs fixos, como telas de projeção e os *desktops* [68].

Os HMDs são os dispositivos mais utilizados no setor industrial, seguidos dos dispositivos de visão indireta, conforme ilustra a Figura 23, referente à revisão sistemática de literatura efetuada por Souza Cardoso et al., [73] com o objetivo de avaliar a aplicabilidade e utilidade da RA nos processos industriais.

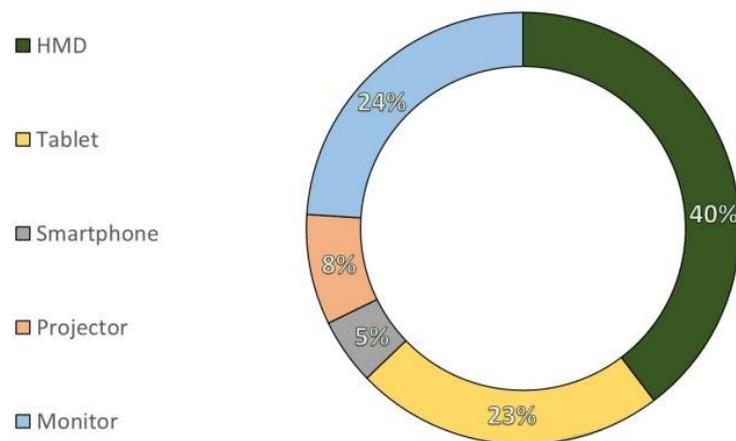


Fig. 23. Percentagem de dispositivos de visualização de RA em aplicações industriais [73]

¹³ A imagem à esquerda ilustra o capacete com visão direta enquanto a imagem da direita ilustra o capacete com visão direta por vídeo.

A informação nos sistemas de RA pode ser transmitida ao utilizador sob a forma de instruções de texto, em áudio ou em vídeo, através de imagens e figuras, modelos 3D ou avatares virtuais, etiquetas de localização e através de ligações remotas com outros utilizadores, mediante a ligação por vídeo e/ou áudio [46].

– Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados é necessário para armazenar e permitir a interação da informação utilizada no sistema de RA, como modelos *Computer-aided design* (CAD), imagens, vídeos, ficheiros de áudio, etc. Estes dispositivos podem ser *tablets*, *smartphones*, *datagloves*,¹⁴ entre outros [69].

6.4.5. Campos de aplicação

Esta tecnologia apresenta diversos campos de utilização, em vários segmentos industriais, designadamente na indústria automóvel, aeronáutica, marítima, energética e mecânica, na arquitetura, na construção e gestão de infraestruturas, na logística, entre outros [73]. Algumas das principais aplicações da RA são, o projeto e desenvolvimento de novos produtos, o apoio à produção, a orientação de tarefas de montagem, a formação e a manutenção de equipamentos [74].

Indo ao encontro do objetivo desta dissertação, os campos de aplicação a abordar de seguida relacionam-se com a manutenção aeronáutica e a formação dos TMA.

As atividades de manutenção, nomeadamente na indústria dos transportes, que apresentam prazos de execução rigorosos e que acarretam custos avultados quando se verificam cancelamentos ou atrasos dos serviços, são frequentemente realizadas sob pressão e muito dispendiosas devido ao *downtime* dos equipamentos. Durante as operações de manutenção, os TMA têm de utilizar uma quantidade substancial de componentes, diferentes sistemas e a respetiva documentação técnica, despendendo muito tempo a procurar e interpretar manuais, procedimentos e ordens de trabalho.

¹⁴ Dispositivo háptico que melhora a sensação imersiva e interativa dos utilizadores.

O recurso à RA procura a otimização da sua execução, com o aumento da eficiência, reduzindo o número de erros, e da eficácia, diminuindo os tempos de intervenção, através da disponibilização de informação multimédia atualizada aos utilizadores.

Além de assegurar que os utilizadores têm acesso à correta informação no momento ideal, o conteúdo disponibilizado em formato digital pode ser mais detalhado do que os formatos convencionais, auxiliando os trabalhadores e promovendo a redução do uso de papel, contribuindo conseqüentemente para a sustentabilidade ambiental [74], [75].

Segundo os resultados obtidos por Loizeau et al., [76] no decorrer de uma experiência com o objetivo de analisar o impacto da RA no desempenho dos TMA, numa ação de manutenção composta por 8 subtarefas, verificaram-se resultados promissores face à implementação desta tecnologia. A experiência consistiu em analisar o rendimento de 9 TMA com diferentes níveis de experiência profissional, recorrendo à RA, efetuando a comparação dos tempos de compreensão e de execução das tarefas face ao método convencional, que recorre ao suporte físico de manuais e de instruções de trabalho. Tendo em conta os resultados obtidos, este estudo demonstrou que o tempo de compreensão das tarefas a executar diminuiu em média 30% para todos os participantes, enquanto que o tempo de execução aumentou em média 16%, facto que os autores presumiram estar relacionado com a utilização de uma nova ferramenta de trabalho para os participantes. Outro dado relevante é que os participantes com maior experiência, ou seja, mais de 3 anos, demonstraram ter o pior aproveitamento entre os restantes perfis. Este aspeto pode justificar-se pelo facto destes profissionais apresentarem um maior conhecimento e prática ao realizar as tarefas pretendidas, levando a uma maior dificuldade de adaptação ao recurso da RA.

A utilização da RA na formação de trabalhadores apresenta a grande vantagem de possibilitar o contacto e a experiência no local de trabalho – *on-the-job training* (OJT), relativamente à RV onde o ambiente é totalmente virtual, ou outras tecnologias multimédia [74]. Outros benefícios relevantes são, a possível diminuição do tempo de formação e conseqüentemente a redução do seu custo, a capacidade de guiar os formandos durante as diversas etapas de uma tarefa, através do destaque de componentes específicos, da indicação de perigos, ou de procedimentos a evitar, entre outros [75].

6.4.6. Benefícios e limitações

Os principais benefícios da RA no setor industrial são a diminuição do tempo de execução das tarefas, a melhoria da qualidade dos processos e da aprendizagem dos trabalhadores, sendo que, estes fatores contribuem decisivamente para a redução de custos. Outra vantagem agregada a esta tecnologia é a promoção da segurança e saúde dos utilizadores, como por exemplo na simplificação da programação de robôs que interajam com humanos, permitindo a sua avaliação em ambientes reais, de modo a evitar colisões, ou na redução do volume de trabalho, respetivamente. Alguns estudos identificam também o facto da disponibilização de informação localmente poder acelerar na tomada de decisões dos utilizadores [73].

As limitações desta tecnologia relacionam-se principalmente com o *hardware*, com a qualidade e precisão de projeção e a interatividade com os utilizadores, com os métodos de rastreamento, com a saúde e aceitação dos utilizadores, com a sua complexidade e custos de implementação [73].

As limitações do *hardware* estão associadas com a adaptação à natureza dos trabalhos. A necessidade dos utilizadores terem as mãos e o campo de visão livres nas suas atividades pode não se coadunar com alguns dos dispositivos de RA. As condições de segurança e do ambiente de trabalho, como a utilização de EPI's, o ruído ou a luminosidade são fatores que podem dificultar ou inviabilizar a interatividade entre o utilizador e o sistema. Os principais problemas relacionados com a qualidade e precisão de projeção são a baixa resolução e as formas pouco distintas, ou fora de posição dos objetos virtuais [73].

Os desafios do método de rastreamento por marcadores são a sua obstrução por componentes, ferramentas ou sombras, bem como o seu tamanho e posição que podem constituir barreiras à execução de algumas tarefas [73].

Apesar desta tecnologia oferecer benefícios na saúde dos utilizadores, também apresenta desvantagens neste campo, dado que, a utilização de um campo de visão inferior ao humano nos HMD, pode causar dores de cabeça e náuseas em longos períodos de utilização, assim como desconforto devido ao seu peso. A utilização de óculos graduados é outra limitação para alguns dispositivos de RA [73].

Com a tendência atual do desenvolvimento dos produtos orientada para o aumento da complexidade, da precisão e para a sua miniaturização, as necessidades de projeto e de manutenção têm-se tornado cada vez maiores. A i4.0 e o surgimento das novas tecnologias de informação vieram introduzir dinamismo e modernização aos diversos setores industriais, com a digitalização das suas funções, produtos e serviços, promovendo o apoio no desenvolvimento das organizações e a melhoria dos seus processos [77].

Este capítulo incidiu sobre a evolução da revolução industrial, a i4.0 e as tecnologias de informação em que se fundamenta, dando particular destaque à RA. A abordagem pormenorizada desta tecnologia justifica-se pelo seu enfoque no capítulo seguinte, constituindo uma proposta de intervenção no âmbito do cumprimento de procedimentos de manutenção.

7. Proposta de intervenção

Os procedimentos documentados são um pilar na indústria aeronáutica, sendo obrigatórios em inúmeras tarefas na aviação. Ao longo dos últimos anos, têm sido regulares os acidentes e incidentes que resultam do incumprimento de procedimentos. Este panorama levou a que a FAA, tenha procurado dar resposta a este problema, indo além da sua classificação exclusivamente como mais uma causa de acidentes.

A investigação e o estudo efetuados pela FAA, com a colaboração de Drury et al. [78], deram origem a um sistema de classificação de eventos cuja causa é o incumprimento de procedimentos – “*Failure to Follow Procedures*” (FFP), denominado “*TAPES*”, indicado na Tabela 8. A aplicação deste sistema a um vasto número de eventos (248 – 94 dos quais da base de dados NTSB e 154 relatórios do sistema de reporte de ocorrências – *Aviation Safety Reporting System* (ASRS)), entre 1999 e 2015, permitiu concluir que a principal causa dos FFP incide sobre o *design*, o controlo e a revisão dos próprios procedimentos, seguido do sistema social que envolve as atividades de manutenção, onde contribuem fatores como a pressão para cumprir prazos, a falha da disponibilização de um procedimento de uma tarefa, entre outras.

O relatório finaliza elencando o seguinte conjunto de boas práticas [78]:

1. Os procedimentos devem ser tecnicamente precisos.
2. Os procedimentos devem ser desenvolvidos considerando as diretrizes relativas à prevenção da ocorrência dos fatores humanos.
3. Os procedimentos devem incluir o contributo dos utilizadores com conhecimento de causa sobre a tarefa a desempenhar.
4. Os procedimentos devem ser validados através da observação direta da sua utilização.
5. Os procedimentos devem ser objeto de revisão de modo a serem atualizados.
6. Os procedimentos devem ser elaborados apenas quando necessário. Devem ser tidas em conta as competências dos técnicos, evitando incluir tarefas básicas para o seu grau de aptidão.
7. A política organizacional deve seguir a incentivar a utilização dos procedimentos.
8. Os procedimentos devem estar disponíveis para os utilizadores sempre que sejam necessários. Estes devem conseguir ter acesso aos procedimentos corretos.

9. A pressão associada ao cumprimento de prazos não deve comprometer a qualidade, e conseqüentemente, o cumprimento de procedimentos.
10. Os colaboradores são formados adequadamente e com o grau de conhecimento apropriado.
11. Os colaboradores têm disponível e conhecem o plano de melhoria ou otimização de procedimentos.
12. Os procedimentos devem ser disponibilizados num meio de comunicação intuitivo e num formato acessível ao posto de trabalho.
13. Existência de uma política destinada à gestão da incorreta instalação de peças na aeronave.
14. Os postos de trabalho devem proporcionar boas condições de trabalho (Ex. iluminação eficiente).

Tabela 8. Sistema de classificação TAPES (elaborado pelo autor da dissertação)

T - <i>Task</i>	Tarefa de manutenção a ser executada
A - <i>Actor</i>	Colaborador que vai desempenhar a tarefa
P - <i>Procedure</i>	Procedimento documentado utilizado para a realização da tarefa
E - <i>Environment</i>	Contexto ambiental onde é desempenhada a tarefa
S - <i>Social</i>	Interações sociais entre o colaborador e a chefia

Tendo em consideração os resultados obtidos através da análise de estudos de caso, efetuada na secção 3.4 do presente trabalho, onde se verifica que o fator causal dos acidentes e incidentes que apresenta maior predominância é o incumprimento de procedimentos por parte dos TMA, será apresentada uma proposta que vise a promoção do cumprimento de procedimentos, justificada no seguinte subcapítulo e apresentada em anexo.

7.1. Proposta de formação – Realidade aumentada

A manutenção aeronáutica e a formação dos TMA representam um dos fatores mais importantes na segurança do setor. Os requisitos físicos e cognitivos necessários para desempenhar as tarefas de manutenção são determinantes para o seu sucesso. Face às novas tecnologias e técnicas de manutenção, a formação específica e contínua dos TMA é fundamental para garantir a sua qualificação e atualização ao mais alto nível.

Uma parte considerável do tempo do turno de trabalho dos TMA é empregue a procurar e a interpretar os procedimentos e outros tipos de documentação técnica, necessários para a execução das suas tarefas [79]. A utilização de procedimentos em formato físico, requer que os técnicos despendam muito tempo a interpretar, a analisar e a transpor a informação recolhida para desempenharem as suas funções [80]. A RA é uma tecnologia com capacidade para intervir neste âmbito, apresentando os diversos benefícios mencionados anteriormente. Vários têm sido os estudos que comprovam a sua utilidade no aperfeiçoamento do trabalho cuja execução depende de procedimentos. Braly et al., [78] enumeram diversos estudos com resultados promissores, que demonstram que a utilização de instruções através da RA promoveu a conclusão de tarefas de manutenção de forma mais eficaz, eficiente e intuitiva e a localização espacial das tarefas subsequentes, comparativamente aos procedimentos em formato físico. Outro aspeto a realçar é o facto da utilização da RA se justificar apenas no auxílio de tarefas complexas, uma vez que em tarefas simples e repetitivas não se verificam diferenças significativas com o método convencional.

Posto isto, resta averiguar a posição da entidade regulamentadora responsável pela segurança e proteção ambiental na aviação civil, face aos novos métodos de formação e às novas tecnologias.

Segundo a proposta de adenda de regulamentação sobre a avaliação das vantagens e desvantagens de novos métodos de treino e tecnologias de ensino, desenvolvida por um grupo de trabalho composto por membros experientes da indústria aeronáutica e por autoridades da aviação civil, são vários os impactos económicos, sociais e de segurança face à implementação das novas tecnologias, como ilustra a Tabela 9.

A EASA conclui deste modo, que a melhor opção é proceder à revisão da regulamentação da Parte 66 e Parte 147, referentes às licenças de manutenção aeronáutica e das entidades

de formação, respetivamente, de forma a introduzir os novos métodos de formação e as novas tecnologias [81].

Tabela 9. Análise dos impactos da implementação de novas tecnologias e técnicas de manutenção.

Adaptado de [81]

Área de Impacto	Vantagens	Desvantagens
Segurança	<ul style="list-style-type: none"> • Interactividade, eficiência e qualidade da aprendizagem, promovendo maior motivação e empenho dos formandos. • Enquadramento e validação de novas tecnologias e métodos de ensino evita a sua incorreta utilização. • Níveis superiores de normalização e de uniformização. • Redução de riscos associados à formação prática em aeronaves, uma vez que podem ser executada fora das mesmas, em ambientes mais seguros. 	<ul style="list-style-type: none"> • Não identificadas.
Económica	<p>Para as organizações de manutenção:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Possível redução do tempo de ensino em sala de aula, através da combinação dos métodos de ensino tradicionais e à distância. • Redução de custos associados às deslocações a aeronaves e respetiva disponibilidade assim como seguros e responsabilidades associadas. • Potencial crescimento de receitas devido à maior disponibilidade de tempo e de recursos para cursos adicionais. • Redução da duração e dos custos de formação. • Maior disponibilidade dos colaboradores para desempenhar as suas tarefas e menores despesas de transporte e alojamento. <p>Para os formandos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Redução das despesas, duração da formação e tempo de aprendizagem, com retorno do investimento mais célere. <p>Para os fornecedores:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aumento das receitas devido ao crescimento e desenvolvimento destas tecnologias, com potencial impacto positivo nos preços de mercado. 	<p>Para as organizações de manutenção:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Custos adicionais de implementação de novos dispositivos de ensino e <i>software</i>, formação dos formadores e desenvolvimento de novos procedimentos. <p>Para as autoridades de aviação civil:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Encargos administrativos superiores. • Custos de implementação adicionais relacionados com a adaptação de procedimentos, de formação de pessoal para novas competências exigidas e a possível necessidade de recrutamento de recursos humanos.
Social	<ul style="list-style-type: none"> • Atratividade da utilização de novos métodos e tecnologias promove maior motivação e empenho dos formandos. • Conveniência do ensino a partir de casa ou de qualquer outro lugar e a qualquer hora, tornando a formação mais acessível para os técnicos de manutenção. 	<ul style="list-style-type: none"> • Não identificadas.

A proposta de formação apresentada no Anexo 1, destina-se a TMA de perfil principiante ou intermédio, tendo como objetivo fornecer aos formandos uma compreensão completa da tecnologia de RA e a experiência prática da sua utilização. Esta proposta visa ser aplicada por entidades de formação segundo a Parte 147 do Regulamento UE [22] e está estruturada da seguinte forma:

– **Módulo 1**

Este primeiro módulo é dedicado à apresentação dos conteúdos programáticos, dos métodos de avaliação, dos formandos e do formador, sendo realizada uma ficha de diagnóstico para a verificação de conhecimentos pré-adquiridos sobre o programa da formação. A exposição de conteúdos didáticos tem início com a introdução histórica sobre a revolução industrial e com as TI presentes na i4.0. Neste módulo pretende-se que os formandos consigam identificar as fases da revolução industrial e distinguir as tecnologias em que assenta a i4.0.

– **Módulo 2**

No segundo módulo, de forma a enquadrar e contextualizar a definição de RA, é abordada a RM, assim como a RV, sendo realizada a distinção destes conceitos em função do grau de realidade que apresentam. De seguida, é aprofundado o tema da RA, sendo abordadas as suas primeiras aplicações na indústria, classificações (visão direta e indireta), métodos de apresentação de informação, dispositivos de *hardware*, vantagens e limitações.

– **Módulo 3**

Neste módulo, é abordada a constituição de um sistema de RA, estando dividido em 5 sub-módulos, referentes aos principais elementos de *hardware* e *software*:

- Sub-módulo 3.1 - Sistema Informático.
- Sub-módulo 3.2 - Métodos de captura de vídeo.
- Sub-módulo 3.3 - Sistema de rastreamento.
- Sub-módulo 3.4 - Dispositivos de saída de dados.
- Sub-módulo 3.5 - Sistema de aquisição de dados.

– **Módulo 4**

O quarto e último módulo compreende a componente prática da formação, correspondendo a 60% da duração da mesma, visando proporcionar aos formandos o contacto com dois dispositivos de RA no decorrer de ações de manutenção em aeronaves.

No sub-módulo 4.1 é utilizado o HMD, o dispositivo de visão direta mais usual nas aplicações industriais. O sub-módulo 4.2 apresenta os mesmos moldes do anterior, no entanto o dispositivo utilizado é o *tablet*. Desta forma, a componente prática da formação tem como objetivo facultar aos formandos o contacto com dois dos dispositivos de RA mais comuns na indústria, permitindo assim a sua familiarização com um dispositivo de visão direta e outro de visão indireta, em contexto de trabalho simulado.

8. Conclusão e trabalhos futuros

8.1. Conclusão

A indústria aeronáutica jamais poderia operar sem o contributo da manutenção. Contudo, as falhas de manutenção representam uma ameaça significativa para a segurança da aviação. A evolução neste setor permitiu que estas falhas passassem a ser reconhecidas tendo em conta o envolvimento de vários fatores, como fatores humanos, organizacionais, condições de trabalho, entre outros, em vez de serem considerados exclusivamente como erros humanos, pressupondo apenas que os técnicos falharam na execução das suas tarefas.

Como referido inicialmente, esta dissertação tem como principal finalidade a análise de acidentes e incidentes, verificados nos LG de aeronaves a motor complexas, ocorridos devido a ações de manutenção com o objetivo de apurar as principais falhas neste setor e formular uma proposta que vise a sua mitigação, perspetivando a promoção da segurança aeronáutica.

Este objetivo foi cumprido, na medida em que, através do estudo de casos reais e das estatísticas de ocorrências de aviação apresentadas, se pôde constatar que a principal causa de acidentes e incidentes, originados por falhas de manutenção nos LG, é o incumprimento de procedimentos. Assim sendo, neste trabalho apresentou-se uma proposta de formação recorrente, visando a atualização dos TMA, baseada na tecnologia de RA.

Esta tecnologia tem vindo a demonstrar resultados promissores na indústria aeronáutica, onde os trabalhos de manutenção são caracterizados pela sua elevada exigência e complexidade associadas ao elevado nível de segurança e regulamentação do setor. As principais vantagens da sua aplicação na manutenção aeronáutica estão relacionadas com o aumento da eficiência e da eficácia, o que se traduz na redução dos erros e dos tempos de execução e interpretação das tarefas.

A utilização da RA na formação poderá conduzir à melhoria dos processos de aprendizagem. A possibilidade de formação OJT em tarefas de manutenção específicas, caracterizadas por serem dispendiosas ou perigosas, representa uma das vantagens da formação com recurso à RA, proporcionando o treino e a experiência dos técnicos no desempenho de tarefas complexas. A tomada de decisão mais célere, mais eficaz e mais

precisa, associada à maior disponibilidade de informação no local de trabalho e à menor exigência mental nas tarefas, comparativamente aos métodos com instruções em papel, constituem outras das mais valias desta tecnologia, assim como a interatividade entre o utilizador e o sistema que pode suscitar uma maior atratividade por parte dos técnicos a este método de formação.

Embora fora do âmbito desta dissertação, teria sido interessante validar junto de uma entidade formadora a proposta de intervenção apresentada e as vantagens inerentes à sua utilização. Porém, não seria possível, em tempo útil, implementar tal proposta, analisá-la e concluir sobre os resultados obtidos.

8.2. Trabalhos futuros

Tendo em conta o exposto neste trabalho, seria pertinente a realização de um trabalho futuro que contemplasse a implementação prática e a avaliação da proposta de formação apresentada, uma vez que os atuais desenvolvimentos no âmbito das tecnologias de informação vão ao encontro da sua aplicação na indústria aeronáutica. Recentemente, a EASA aprovou o primeiro dispositivo de simulação de voo baseado na RV, destinado a pilotos de helicópteros, permitindo a prática de manobras perigosas em ambientes virtuais, comprovando desta forma a sua ambição na modernização da regulamentação no campo das novas tecnologias [83]. Segundo o estudo realizado por Souza Cardoso et al., [73] as perspectivas futuras no campo da RA envolvem a reflexão e a análise de aspetos de mobilidade, ergonomia, saúde e sustentabilidade.

A necessidade de dispositivos leves, com autonomia para longos períodos de utilização e que não limitem a atividade nem o campo de visão dos utilizadores, constituem os principais desafios para a aplicação da tecnologia de RA em larga escala. A investigação dos impactos a nível da saúde, no que diz respeito a aspetos físicos e mentais associados à utilização contínua dos dispositivos, bem como os impactos ambientais relacionados com a implementação desta tecnologia, face aos métodos tradicionais, são igualmente fatores que carecem de uma análise mais aprofundada.

Face ao exponencial crescimento verificado atualmente na utilização e no aperfeiçoamento dos dispositivos de RA e na sua atualização e melhoria no que diz respeito ao *software* e *hardware*, espera-se que estes possam ser, em breve, uma opção com maior aplicação na manutenção aeronáutica, perspectivando-se um impacto forte e positivo no cumprimento dos procedimentos de manutenção.

Bibliografia

- [1] A. Fernandes, “Compêndio Estruturas e Sistemas de Aeronaves”, Ministério da Defesa Nacional - Força Aérea Portuguesa, Ed. 2008, pp. 78–95.
- [2] M. J. Kroes, W. A. Watkins, F. Delp, e R. Sterkenburg, “Aircraft Maintenance and Repair”, 7 Edition., McGraw-Hill, 2014, pp. 57, 444–471.
- [3] “Configuração convencional do trem de aterragem”. Disponível em: <https://www.gettyimages.pt/ilustrações/stunt-plane>
- [4] P. Phillips, D. Diston, A. Starr, J. Payne, e S. Pandya, “A review on the optimisation of aircraft maintenance with application to landing gears”, em *Engineering Asset Lifecycle Management - Proceedings of the 4th World Congress on Engineering Asset Management, WCEAM 2009*, 2009, pp. 68–76. doi: 10.1007/978-0-85729-320-6_9.
- [5] Conselho da União Europeia, *DIRECTIVA 94/56/CE*. 1994, pp. 319/14-319/18. [Em linha]. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:31994L0056&from=EN>
- [6] J. Reason, “The Identification of Latent Organizational Failures in Complex Systems”, em *Verification and Validation of Complex Systems: Human Factors Issues*, 1993, pp. 223–237. doi: 10.1007/978-3-662-02933-6_13.
- [7] J. Reason, “Managing the Risks of Organizational Accidents”, Ashgate Publishing Limited, 1997, pp. 9–13.
- [8] ICAO, “Annex 13 - Part III Investigation Doc 9756, Manual of Aircraft Accident and Incident Investigation”, 1 Edition., International Civil Aviation Organization, 2011, p. III 3-1, 3-2, 20-2.
- [9] J. Reason, E. Hollnagel, e J. Paries, “Revisiting the “Swiss Cheese” Model of Accidents”, 2006. doi: 10.1016/b978-0-444-86237-2.50059-7.
- [10] M. S. Reveley, J. L. Briggs, M. A. Thomas, J. K. Evans, e S. M. Jones, “An Examination of Commercial Aviation Accidents and Incidents Related to Integrated Vehicle Health Management”, 2011.

- [11] FAA, *14 CFR Part 91*, vol. 91. 2001, p. 10.
- [12] Comissão Europeia, *REGULAMENTO (UE) N.º 965/2012*. 2012, p. 296/2. [Em linha]. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012R0965&from=EN>
- [13] IATA, “2021 Safety Report”, 2022.
- [14] J. Brannen, “National transportation safety board. Aviation Accident Final Report”, 2021. [Em linha]. Disponível em: <https://data.nts.gov/carol-reppen/api/Aviation/ReportMain/GenerateNewestReport/90712/pdf>
- [15] BEA, “Lateral runway excursion during landing roll, nose landing gear collapse”, 2013. [Em linha]. Disponível em: https://reports.aviation-safety.net/2012/20121116-0_A30B_EI-EAC.pdf
- [16] ICAO, “Annex 14 - Aerodrome Design and Operations”, 8 Edition., vol. I, International Civil Aviation Organization, 2018, p. ATT A-15.
- [17] BEA, “Vibrations, failure of the right main landing gear torsion link during landing roll Aircraft”, 2012. [Em linha]. Disponível em: <https://bea.aero/docspa/2011/g-ld110723.en/pdf/g-ld110723.en.pdf>
- [18] D. Helson, “National transportation safety board. Aviation Accident Final Report”, 2015. [Em linha]. Disponível em: <https://data.nts.gov/carol-reppen/api/Aviation/ReportMain/GenerateNewestReport/84047/pdf>
- [19] J. Lovell, “National transportation safety board. Aviation Accident Final Report”, 2020. [Em linha]. Disponível em: <https://data.nts.gov/carol-reppen/api/Aviation/ReportMain/GenerateNewestReport/86939/pdf>
- [20] A. Gerhardt, “National transportation safety board. Aviation Accident Final Report”, 2021. [Em linha]. Disponível em: <https://data.nts.gov/carol-reppen/api/Aviation/ReportMain/GenerateNewestReport/100403/pdf>
- [21] E. Simpson, “National transportation safety board. Aviation Accident Final Report”, 2014. [Em linha]. Disponível em: <https://data.nts.gov/carol-reppen/api/Aviation/ReportMain/GenerateNewestReport/86889/pdf>

- [22] Comissão Europeia, *REGULAMENTO (UE) N.º 1321/2014*. 2014, pp. 362/2-362/3, 362/13, 362/25-362/26. [Em linha]. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:02014R1321-20220331&from=EN>
- [23] Comissão Europeia, *REGULAMENTO DE EXECUÇÃO (UE) N.º 2019/1383*. 2019, pp. 228/2, 228/12, 228/25-228/26. [Em linha]. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1383&from=PT>
- [24] R. M. H. Knotts, “Civil aircraft maintenance and support”, 1999. [Em linha]. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/JQME-10-2016-0056/full/html>
- [25] D. Chen, X. Wang, e J. Zhao, “Aircraft maintenance decision system based on real-time condition monitoring”, *Procedia Eng.*, vol. 29, pp. 765–769, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.01.038.
- [26] T. Alves, “Aeronavegabilidade [Powerpoint slides]”, *Instituto Universitário Atlântica*, 2020. [Em linha]. Disponível em: <https://moodle.uatlantica.pt/course/view.php?id=85>
- [27] EASA, “Airworthiness Directive (AD)”. <https://www.easa.europa.eu/domains/aircraft-products/airworthiness-directives-ad> (acedido 19 de Junho de 2022).
- [28] H. A. Kinnison, “AVIATION MAINTENANCE MANAGEMENT”, McGraw-Hill, 2004, pp. 15–44, 62–63.
- [29] ICAO, “Convention on International Civil Aviation Doc 7300/9”, 9 Edition., International Civil Aviation Organization, 2006, p. 20. [Em linha]. Disponível em: <http://www.icao.int/publications/Pages/doc7300.aspx>
- [30] ICAO, “About ICAO”, *Icao*, 2022. <http://www.icao.int/about-icao/Pages/default.aspx> (acedido 14 de Maio de 2022).
- [31] EASA, “The Agency”, 2022. <https://www.easa.europa.eu/the-agency/the-agency> (acedido 14 de Maio de 2022).

- [32] Comissão Europeia, *REGULAMENTO (UE) 2018/1139*, vol. 2018, n. 2. 2018, pp. 212/57-212/58. [Em linha]. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R1139&from=EN>
- [33] ANAC, “Quem somos”, 2022. <https://www.easa.europa.eu/the-agency/the-agency> (acedido 14 de Maio de 2022).
- [34] European Committee for Standardization, *EN 13306/2017*. 2017, pp. 8, 34–45, 58–59.
- [35] British Standards Institution, *BS 3811:1984*. 1984, pp. 1–5.
- [36] J. Sobral, “Gestão da Manutenção [Powerpoint slides]”, *Instituto Superior de Engenharia de Lisboa*, 2018. [Em linha]. Disponível em: <https://2122moodle.isel.pt/enrol/index.php?id=5248>
- [37] M. Ben-Daya, U. Kumar, e D. N. P. Murthy, “Introduction to Maintenance Engineering”, L. John Wiley & Sons, Ed. 2016, pp. 73–84, 126.
- [38] Boeing, “A sample condition monitoring program for application of the primary maintenance processes: Condition monitoring, On condition, Hard time”. pp. 1–14.
- [39] N. Domingues, “Industry 4.0 in maintenance: using condition monitoring in electric machines”, em *International Conference on Decision Aid Sciences and Application (DASA)*, 2021, pp. 1–2. doi: 10.1109/DASA53625.2021.9682254.
- [40] N. Sakib e T. Wuest, “Challenges and Opportunities of Condition-based Predictive Maintenance: A Review”, *Procedia CIRP*, vol. 78, pp. 267–272, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.08.318.
- [41] A. Kählert, “Specification and Evaluation of Prediction Concepts in Aircraft Maintenance”, 2017. [Em linha]. Disponível em: http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/6065/7/20170403_Dissertation_Kaehlert_color.pdf
- [42] R. S. Beebe, “Predictive Maintenance of Pumps Using Condition Monitoring”, em *New Electronics*, vol. 43, n. 19, Elsevier Science & Technology Books, 2004, pp. 3–4.

- [43] A. Figueira, “Desenvolvimento de um sistema de controlo da manutenção numa PME”, 2021. [Em linha]. Disponível em: <https://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/13145>
- [44] I. Oliveira, “Atrasos de Voo. Optimização do programa de manutenção da TAP AIR PORTUGAL”, 2020.
- [45] E. Santos, “MANUTENÇÃO AERONÁUTICA PREDITIVA – PROCEDIMENTOS, TÉCNICAS E BUSINESS MODELS”, 2019.
- [46] R. Fonseca, “Tecnologias de Informação na Manutenção Aeronáutica”, INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA, 2021.
- [47] D. Dinis, “Análise do Line Maintenance Manual numa perspectiva de melhoria contínua do Programa de Manutenção Avião”, 2009.
- [48] A. Ahmadi, P. Söderholm, e U. Kumar, “An overview of trends in aircraft maintenance program development: Past, present, and future”, 2007.
- [49] R. Kennedy, “Examining the Processes of RCM and TPM”, n. January, pp. 1–15, 2006.
- [50] B. B. . Ramesh, B. S. . Augustine, K. . Narayanan, e S. Koloanjiappan, “Evaluation of Aircraft Maintainability and Aircraft Maintenance”, *Int. Conf. Exhib. Emerg. Challenges Des. Manuf. Technol.*, n. November 2007, p. 318, 2007, [Em linha]. Disponível em: https://www.google.ae/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjW4dSOu_XdAhUIFogKHSx4DZsQFjAAegQIABAB&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fpublication%2F278782607_Evaluation_of_Aircraft_Maintainability_and_Aircraft_Maintenanc
- [51] H. Kagermann, W. Wahlster, e J. Helbig, “Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0”, 2013. [Em linha]. Disponível em: <https://www.din.de/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf>
- [52] D. Cozmiuc e I. Petrisor, “Industrie 4.0 by siemens: Steps made today”, *J. Cases*

- Inf. Technol.*, vol. 20, n. 2, p. 3, 2018, doi: 10.4018/JCIT.2018040103.
- [53] E. H. Østergaard, “Indústria 5.0: O retorno do toque humano”, 2020. <https://www.universal-robots.com/br/blog/indústria-50-o-retorno-do-toque-humano/>
- [54] J. Müller, “Enabling Technologies for Industry 5.0”, 2020. doi: 10.2777/082634.
- [55] W. Wahlster, “TEN YEARS OF INDUSTRIE 4.0”, *DFKI News*, pp. 6–11, 2021.
- [56] S. S. Kamble, A. Gunasekaran, e S. A. Gawankar, “Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives”, *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 117, pp. 408–425, 2018, doi: 10.1016/j.psep.2018.05.009.
- [57] F. J. B. Laurindo, T. Shimizu, M. M. de Carvalho, e R. Rabechini Jr, “O papel da tecnologia da informação (TI) na estratégia das organizações”, 2001. doi: 10.1590/s0104-530x2001000200005.
- [58] C. W. Onn e S. Sorooshian, “Mini Literature Analysis on Information Technology Definition”, 2013.
- [59] M. Rüßmann *et al.*, “Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing”, 2015. doi: 10.1007/s12599-014-0334-4.
- [60] E. Cagno, A. Neri, M. Negri, C. A. Bassani, e T. Lampertico, “The role of digital technologies in operationalizing the circular economy transition: A systematic literature review”, 2021. doi: 10.3390/app11083328.
- [61] A. Grau, M. Indri, L. Bello, e S. Thilo, “Robots in Industry - The Past, Present, and Future of a Growing Collaboration With Humans”, *IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS MAGAZINE*, pp. 50–51, 2020. doi: 10.1049/esn.1983.0038.
- [62] F. Nascimento, “Processos de Produção [Powerpoint slides]”, *Instituto Universitário Atlântica*, 2020. [Em linha]. Disponível em: <https://moodle.uatlantica.pt/course/view.php?id=82>
- [63] H. Eschen, T. Kötter, R. Rodeck, M. Harnisch, e T. Schüppstuhl, “Augmented and

- Virtual Reality for Inspection and Maintenance Processes in the Aviation Industry”, Elsevier B.V., 2018. doi: 10.1016/j.promfg.2018.01.022.
- [64] P. Milgram e K. Fumio, “A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays”, 1994. [Em linha]. Disponível em: https://cs.gmu.edu/~zduric/cs499/Readings/r76JBo-Milgram_IEICE_1994.pdf
- [65] H. Rios, E. González, C. Rodriguez, H. R. Siller, e M. Contero, “A mobile solution to enhance training and execution of troubleshooting techniques of the engine air bleed system on boeing 737”, Elsevier Masson SAS, 2013. doi: 10.1016/j.procs.2013.11.020.
- [66] D. R. Berryman, “Augmented Reality: A Review”, *Med. Ref. Serv. Q.*, vol. 31, n. 2, pp. 212–218, 2012, doi: 10.1080/02763869.2012.670604.
- [67] T. P. Caudell e D. W. Mizell, “Augmented reality: An Application of Heads-Up Display Technology to Manual Manufacturing Processes”, 1992. doi: 10.1109/hicss.1992.183317.
- [68] C. Kirner, R. A. Siscoutto, e R. Tori, “Fundamentos de Realidade Virtual e Aumentada”, R. Tori, C. Kirner, e R. Siscoutto, Eds. SBC – Sociedade Brasileira de Computação, 2006, pp. 22–38.
- [69] I. Porcelli, M. Rapaccini, D. B. Espíndola, e C. E. Pereira, “Technical and organizational issues about the introduction of augmented reality in maintenance and technical assistance services”, *IFAC Proc. Vol.*, vol. 46, n. 7, pp. 257–262, 2013, doi: 10.3182/20130522-3-BR-4036.00024.
- [70] C. Qiu, S. Zhou, Z. Liu, Q. Gao, e J. Tan, “Digital assembly technology based on augmented reality and digital twins: a review”, Elsevier, 2019. doi: 10.1016/j.vrih.2019.10.002.
- [71] J. P. S. do M. Lima, “Realidade aumentada sem marcadores multiplataforma utilizando rastreamento baseado em modelo”, Universidade Federal de Pernambuco, 2010. [Em linha]. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/2292>

- [72] A. Sheldon *et al.*, “Putting the AR in (AR)chitecture - Integrating voice recognition and gesture control for Augmented Reality interaction to enhance design practice”, 2022. doi: 10.52842/conf.caadria.2019.1.475.
- [73] L. F. Souza Cardoso, F. C. Martins Queiroz Mariano, e E. R. Zorzal, “A Survey of Industrial Augmented Reality”, *Comput. Ind. Eng.*, pp. 1–2, 6–13, 2019, doi: 10.1016/j.cie.2019.106159.
- [74] H. Regenbrecht, G. Baratoff, e W. Wilke, “Augmented reality projects in the automotive and aerospace industries”, *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 25, n. 6, pp. 48–56, 2005, doi: 10.1109/MCG.2005.124.
- [75] P. Piedimonte e S. L. Ullo, “Applicability of the mixed reality to maintenance and training processes of C4I systems in Italian Air Force”, IEEE, 2018. doi: 10.1109/MetroAeroSpace.2018.8453612.
- [76] Q. Loizeau, F. Danglade, F. Ababsa, e F. Merienne, “Evaluating Added Value of Augmented Reality to Assist Aeronautical Maintenance Workers— Experimentation on On-field Use Case”, *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 11883 LNCS, pp. 151–169, 2019, doi: 10.1007/978-3-030-31908-3_10.
- [77] A. B. Correia e P. Deus, “Indústria 4.0”, *Rev. Interface Tecnológica*, vol. 17, n. 2, pp. 3–4, 9–10, 2016, doi: 10.31510/infa.v17i2.980.
- [78] C. G. Drury, C. Drury Barnes, e M. R. Bryant, “Failure to Follow Written Procedures.”, 2017. [Em linha]. Disponível em: <https://libraryonline.erau.edu/online-full-text/faa-aviation-medicine-reports/AM17-17.pdf>
- [79] U. Neumann e A. Majoros, “Cognitive, performance, and systems issues for augmented reality applications in manufacturing and maintenance”, 1998. doi: 10.1109/vrais.1998.658416.
- [80] A. M. Braly, B. Nuernberger, e S. Y. Kim, “Augmented Reality Improves Procedural Work on an International Space Station Science Instrument”, *J. Hum. Factors Ergon. Soc.*, vol. 61, n. 6, p. 866, 2019, doi: 10.1177/0018720818824464.

- [81] EASA, *NPA 2014-22. New training methods and new teaching technologies*, vol. 19. 2016, pp. 20–23, 26–29, 37–46. [Em linha]. Disponível em: https://www.easa.europa.eu/system/files/dfu/NPA_2014-22.pdf
- [82] *Portaria n.º 256/2005*. 2005, pp. 8–9.
- [83] S. von Niederhäusern, “EASA approves the first Virtual Reality (VR) based Flight Simulation Training Device”, *EASA*, 2021. <https://www.easa.europa.eu/newsroom-and-events/press-releases/easa-approves-first-virtual-reality-vr-based-flight-simulation> (acedido 16 de Julho de 2022).
- [84] Comissão Europeia, *REGULAMENTO (CE) N.º 216/2008*. 2008, p. 79/6. [Em linha]. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008R0216&from=PT>
- [85] M. Steel, “OXFORD wordpower”, J. Greenan e A. Waters, Eds. Oxford University Press, 2000, p. 32.

Anexo 1

Proposta de Formação Teórico-Prática

Tecnologia de Realidade Aumentada



Nota. Em <https://zyenalabs.com/en/operationsmaintenance/>

Índice

1. Enquadramento da Proposta.....	3
2. Justificação da Formação	3
3. Área temática da formação.....	4
4. Modalidade da Formação	4
5. Condições de Realização.....	4
6. População Alvo	4
7. Objetivos Gerais do curso	4
8. Conteúdos Programáticos.....	5
9. Métodos e Técnicas Pedagógicas a utilizar.....	5
10. Recursos e Materiais Didáticos a utilizar	5
11. Avaliação	5
12. Avaliação da Formação	6
13. Características da Formação	6

1. Enquadramento da Proposta

A constante inovação tecnológica na indústria aeronáutica, nomeadamente a evolução da complexidade dos sistemas e equipamentos das aeronaves e a implementação de novas tecnologias de manutenção, evidencia a necessidade de melhores competências dos técnicos de manutenção.

A Realidade Aumentada trata-se de uma tecnologia de informação desenvolvida há sensivelmente 3 décadas na indústria aeronáutica, que apresenta atualmente, com o desenvolvimento da Indústria 4.0 ¹, uma significativa evolução nos ambientes industriais face à crescente expansão digital.

2. Justificação da Formação

A manutenção aeronáutica requer um elevado nível de segurança e precisão, face à exigência e complexidade das suas tarefas, estando sujeita a uma forte regulamentação.

A realidade aumentada é uma tecnologia que tem como objetivo otimizar a eficácia da manutenção, através da redução dos erros, promovendo consequentemente uma atividade mais segura, e maximizar a eficiência, reduzindo os tempos das tarefas. Esta ferramenta apresenta inúmeras vantagens, nomeadamente a redução da documentação exaustiva, a possibilidade de orientação remota ou de supervisão de peritos nas tarefas, a capacidade de aceder a dados de trabalho ou de projeto no próprio local da execução da tarefa, a possibilidade de sobrepor objetos entre o mundo real e a realidade virtual, entre outras. Deste modo considera-se essencial lecionar esta formação cujo principal objetivo é dotar os formandos de conhecimentos e competências de forma a prepará-los para a utilização desta nova tecnologia.

¹ A Quarta Revolução Industrial, também designada por Indústria 4.0 surgiu em 2011, e baseia-se na digitalização e integração dos ativos físicos em ecossistemas digitais, possibilitando a capacidade de criar redes inteligentes ao longo de toda a cadeia de valor, permitindo o controlo e a gestão de processos de forma independente (Correia & Deus, 2016).

3. Área temática da formação

Área de formação: Nº 525 - Manutenção Aeronáutica ²

4. Modalidade da Formação

Formação recorrente.

5. Condições de Realização

Regime Presencial – Aulas teóricas em sala de aula³ e aulas práticas em oficina de formação com recurso a componentes, sistemas ou aeronaves ⁴.

6. População Alvo

Técnicos de manutenção aeronáutica de perfil principiante ou intermédio (até 3 anos de experiência) que pretendam especializar-se na tecnologia de Realidade Aumentada aplicada à Manutenção Aeronáutica.

7. Objetivos Gerais do curso

A formação em tecnologia de realidade aumentada, tem como objetivo principal, fornecer aos seus formandos uma compreensão completa acerca desta ferramenta de manutenção e experiência prática na sua utilização, procurando promover a familiarização com esta tecnologia.

² Área de formação segundo a classificação nacional das áreas de educação e formação (Portaria n.º 256/2005, 2005)

Condições de ensino – Codificação (EASA, 2016):

³ Código 14 – Aulas teóricas em sala de aula

⁴ Código 7 – Aulas práticas em oficina de formação com recurso a componentes, sistemas ou aeronaves

8. Conteúdos Programáticos

Ver Anexo 1.1.

9. Métodos e Técnicas Pedagógicas a utilizar

Ver Anexo 1.1.

10. Recursos e Materiais Didáticos a utilizar

Apresentação de material didático em sala de formação ⁵.

Dispositivos móveis (Equipamentos de realidade aumentada: *Tablets, HMDs*) ⁶.

Vídeos ⁷.

Tecnologia de realidade aumentada ⁸.

11. Avaliação

Avaliação Inicial: Ficha de diagnóstico para análise de conhecimentos pré-adquiridos.

Avaliação Contínua – Formativa: Participação nas aulas – 5% da nota final.

Avaliação Contínua – Formativa: Fichas de consolidação de conhecimentos – Média das fichas equivale a 15% da nota final.

Avaliação Contínua – Formativa: Avaliação observacional do desempenho na componente prática – 40% da nota final.

Avaliação Final – Sumativa: Ficha de avaliação global – 40% da nota final.

Condições de ensino – Codificação (EASA, 2016):

⁵ Código 1 – Apresentação de material didático em sala de formação

⁶ Código 4 – Dispositivos móveis

⁷ Código 5 – Vídeos

⁸ Código 12 – Tecnologia de realidade aumentada

12. Avaliação da Formação

A avaliação da formação é obtida através de um questionário de reação/satisfação.

13. Características da Formação

Regime: Pós-laboral

Horário: 2^a, 4^a e 6^a feira das 18:30h - 22:30h

Nº mínimo formandos: 8

Nº máximo formandos: 12

Local de formação: Sala de aula e oficina de formação

Documentação necessária: Cartão de Cidadão ou Bilhete de Identidade e *Curriculum Vitae*

Inscrição: Presencial ou online

Assiduidade: Assiduidade global maior ou igual a 90% da duração total da formação.

O formando terá acesso ao certificado se se verificar a presença em pelo menos 90% das aulas e obtenha uma classificação global igual ou superior a 9,5 valores.

Anexo 1.1

SYLLABUS

Módulos	Conteúdos Programáticos	Objetivos Específicos	Métodos e Técnicas Pedagógicas	Avaliação	Tempo (h)
Módulo 1	<ul style="list-style-type: none"> - Apresentação dos formandos e do formador. - Apresentação dos conteúdos programáticos e dos métodos de avaliação. - Breve introdução histórica sobre a evolução da Revolução Industrial. - Abordagem às Tecnologias de Informação. - Caracterização da Industria 4.0 e apresentação das suas tecnologias. 	<ul style="list-style-type: none"> - Identificar os principais acontecimentos na evolução tecnológica. - Identificar as tecnologias de informação da Industria 4.0. 	<ul style="list-style-type: none"> Ativo (ice-breaker) Expositivo (Exposição) Interrogativo (Inquérito oral) 	<ul style="list-style-type: none"> Inicial (diagnóstico) Formativa (Formulação de perguntas) 	3
Módulo 2	<ul style="list-style-type: none"> - Introdução ao conceito de Realidade Mista, Realidade Virtual e Realidade Aumentada. - Realidade Aumentada. Definição; Primeiras aplicações e dispositivos de <i>hardware</i>; Métodos de apresentação da informação; Vantagens e Limitações. - Classificações da Realidade Aumentada. Visão Direta e Indireta. 	<ul style="list-style-type: none"> - Diferenciar os conceitos de Realidade Mista, Realidade Virtual e Realidade Aumentada. - Identificar as classificações da Realidade Aumentada. - Distinguir os métodos de apresentação de informação relativamente a diversas aplicações. 	<ul style="list-style-type: none"> Expositivo (Exposição) Ativo (Resolução de ficha de consolidação e posterior correção) 	<ul style="list-style-type: none"> Formativa (Formulação de perguntas) Formativa (Ficha de consolidação) 	3
Módulo 3	<ul style="list-style-type: none"> - Constituição do sistema de Realidade Aumentada. - Sub-módulo 3.1 - Sistema Informático. - Sub-módulo 3.2 - Métodos de captura de vídeo. - Sub-módulo 3.3 - Sistema de rastreamento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Identificar a estrutura de um sistema de Realidade Aumentada. - Identificar as funções do sistema informático, reconhecer e diferenciar os diferentes tipos de captura de vídeo e modos de rastreamento. 	<ul style="list-style-type: none"> Expositivo (Exposição) Ativo (Resolução de ficha de consolidação e posterior correção) 	<ul style="list-style-type: none"> Formativa (Formulação de perguntas) Formativa (Ficha de consolidação) 	3

Anexo 1.1

SYLLABUS

Módulos	Conteúdos Programáticos	Objetivos Específicos	Métodos e Técnicas Pedagógicas	Avaliação	Tempo (h)
Módulo 3	- Sub-módulo 3.4 - Dispositivos de saída de dados.	- Identificar os diversos dispositivos de saída de dados.	Expositivo (exposição)	Formativa (Formulação de perguntas)	3
	- Sub-módulo 3.5 - Sistema de aquisição de dados.	- Identificar a função do sistema de aquisição de dados.	Ativo (Resolução de ficha de consolidação e posterior correção)	Formativa (Ficha de consolidação)	
Módulo 4	- Sub-módulo 4.1 - Componente Prática: Dispositivo de visão direta - HMD	- Desempenhar tarefas de manutenção com recurso à realidade aumentada.	Ativo (Intervenções de manutenção em oficina)	Formativa (Observacional)	9
	- Sub-módulo 4.2 - Componente Prática: Dispositivo de visão indireta - Tablet	- Contactar com dois equipamentos de realidade aumentada.	Ativo (Resolução de ficha de avaliação final)	Sumativa (Ficha de avaliação final)	9