



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Mecânica**

**ISEL**



## **Planeamento da Manutenção, após Phase-Out, das Aeronaves Alpha Jet da Força Aérea Portuguesa**

**RÚBEN MIGUEL DA SILVA PIEDADE**

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica, perfil de Manutenção e Produção

Orientador:

Doutor António João Feliciano Abreu

Júri:

Presidente: Doutor João Manuel Ferreira Calado

Vogais:

Doutor José Gomes Requeijo

Doutor António João Feliciano Abreu

**Dezembro de 2017**



## **Agradecimentos**

A realização desta dissertação, para além do carácter individual, carece também do contributo de várias pessoas.

Em primeiro lugar, um especial agradecimento à minha família que sempre me apoiou e sempre me deu força para continuar, nos bons e nos maus momentos.

Ao Professor Doutor António Abreu pela orientação na elaboração deste trabalho, mas também pelo seu profissionalismo e disponibilidade.

Ao Engenheiro Rúben Pedro, o elemento de ligação na Força Aérea Portuguesa, que sempre se disponibilizou para qualquer dúvida sobre a parte técnica do estudo.

Ao Sargento Ajudante Bernardino Viriato, chefe da secção de motores da manutenção Alpha Jet, pela grande disponibilidade, profissionalismo e amizade, mas sobretudo pela grande paciência e compreensão que me demonstrou.

À Força Aérea Portuguesa pela oportunidade concedida para a realização deste estudo.

Para terminar, a todos os meus amigos e colegas de trabalho que contribuíram direta ou indiretamente para a concretização deste trabalho, seja no apoio, na amizade, no incentivo, na compreensão e na paciência.



## **Resumo**

O Phase-Out de um bem, ou ativo, compreende a sua descontinuação e final de operação, podendo, no entanto, esse marco não ter um destino final definido. Por isso, esta tomada de decisão passará pelos vários critérios e cenários, confrontando-se com o dilema de viabilizar a extensão do período de exploração ou encontrar cenários alternativos para a sua utilização, baseados no elevado custo de certos bens e das ações a executar.

Baseado neste contexto, importa saber a viabilidade do prolongamento de operação do bem? Quais as variáveis comprometedoras desse prolongamento? Que ferramentas de análise a utilizar? Quais os cenários a serem considerados?

O presente trabalho tem como propósito desenvolver um modelo de suporte à decisão utilizando uma abordagem multicritério para criação de valor, em termos de planeamento de manutenção, que ajude a responder às questões já referidas, permitindo assim avaliar a viabilidade do prolongamento da operacionalidade de uma frota de aeronaves e.

O modelo proposto baseia-se em três pilares: Identificação do Problema, Análise de Risco e Estratégia de Resposta, que permitem identificar o que compromete a continuidade de operação da frota e analisar as várias alternativas possíveis ao seu destino final, de maneira a criar valor.

O modelo proposto será aplicado à frota Alpha Jet da Força Aérea Portuguesa, que está em período Phase-Out e deixará de operar em Janeiro de 2018, não tendo, no entanto, uma solução definida para o final da frota.

Como forma de enquadramento são apresentados os elementos que influenciam a disponibilidade operacional dos bens. É caracterizada a metodologia RCM, e a sua importância na indústria da manutenção aeronáutica, metodologia de seleção da estratégia de manutenção baseada no comportamento das falhas dos bens, através da ferramenta FMEA. São também caracterizadas as ferramentas de suporte à decisão multicritério, AHP e TOPSIS, com o intuito de hierarquização e seleção da alternativa mais próxima do ideal.

### **Palavras chave**

Disponibilidade Operacional, Planeamento Manutenção, RCM, FMEA, AHP, TOPSIS.



## **Abstract**

The Phase-Out of a good, or asset, comprises its discontinuation and the end of operation, however, this milestone may not have a defined destination. Therefore, this decision-making process will go through several criteria and scenarios, confronting the dilemma of making feasible the extension of the exploration period or finding alternative scenarios for its use, based on the high cost of certain assets and the actions to be performed.

Based on this context, it is important to understand if it is feasible or not the operational extension of a good? Which variables could compromise this extension? Which analysis tools can be used? Which scenarios to be consider?

The purpose of the present dissertation is to develop a decision support model using a multicriteria approach to create value, in terms of maintenance planning, that will help to answer the already mentioned questions, thus allowing the evaluation of the operational extension feasibility of an aircraft fleet.

The proposed model is based on three pillars: Problem Identification, Risk Analysis and Response Strategy, which allowed to identify what could compromise the continuity of operation of the fleet and to analyze several possible alternatives to the final destination, in order to select the closest alternative to the ideal one, which creates more value.

The proposed model will be applied to the Alpha Jet fleet of the Portuguese Air Force, which is in the Phase-Out period and will cease to operate in January 2018, but without a defined solution for the end of the fleet.

As a way of framing, it is presented the elements that influence the operational availability of the goods. It is characterized the RCM, and its importance in the aeronautical maintenance industry, as a methodology to determine the maintenance strategy based on the goods failure behaviors, through the tool FMEA. There are also presented the multicriteria decision-making support tools, AHP and TOPSIS, with the purpose of hierarchizing and selecting the alternative which is the closest to the ideal alternative.

## **Keywords**

Operational Availability, Maintenance Planning, RCM, FMEA, AHP, TOPSIS.





## Glossário

**AD** (*Airworthiness Directive*) – Diretiva de Aeronavegabilidade são procedimentos relativos à segurança requeridos, pela EASA ou FAA, às entidades que operam com certos modelos de aeronaves, motores, aviônicos ou outros sistemas, e são obrigatórios para considerar a aeronave aeronavegável.

**AHP** (*Analytic Hierarchy Process*) - Processo Analítico Hierárquico é um método de análise multicritério que apoia a tomada de decisão quando analisando problemas complexos.

**AIAG** (*Automotive Industry Action Group*) – Organização onde membros da indústria automóvel colaboram e desenvolvem os padrões globais a nível da qualidade, fornecimento entre outras responsabilidades.

**AL** (*Airworthiness Limitations*) – Elementos que foram identificados com críticos, em termos da análise de fadiga ou de dano.

**APC** (*Área de Planeamento e Controlo*) - Setor na estrutura da manutenção da Esquadra 103, da Força Aérea Portuguesa.

**AMM** (*Aircraft Maintenance Manual*) – Manual de Manutenção da Aeronave é o documento formal que detalha como todas as ações de manutenção devem ser executadas.

**AMP** (*Approved Maintenance Program*) – Documento que descreve as tarefas de manutenção de rotina do operador.

**ANAC** (*Autoridade Nacional de Aviação Civil*) – Entidade que regula, fiscaliza e supervisiona as atividades e procedimentos na área da aviação civil em Portugal.

**CIFAAR** (*Curso de Instrutor da Fase Avançada em Aviões a Reação*) - Fase do curso de pilotagem da aeronave Alpha Jet.

**CCM** (*Centro Coordenador de Manutenção*) – Setor na estrutura da manutenção da Esquadra 103, da Força Aérea Portuguesa.

**CMR** (*Certification Maintenance Requirements*) – Tarefas estabelecidas, focadas na deteção de falhas significativas que ponham em causa a segurança, durante a certificação inicial da aeronave, cuja execução é requerida e é executada periodicamente.

**DELPHI** – Método estruturado de comunicação em grupo utilizado na previsão da probabilidade de ocorrência e do resultado de futuros eventos.

**DEMANTEL** (*Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory*) – Método de análise multicritério utilizado na deteção e construção de uma rede complexa de relações, entre os critérios dos problemas, e encontrar soluções utilizando uma estrutura hierárquica.

**DI** (*Depot Inspection*) – Inspeção que requer revisão geral, upgrade ou reconstrução, instalação ou remoção, e testes funcionais.

**DMSA** (*Direção de Manutenção de Sistema de Armas*) – Organismo responsável pela gestão da sustentação dos sistemas de armas da Força Aérea Portuguesa, em termos de aeronavegabilidade, tempo e custo, bem como todos outros sistemas referentes a aeronaves e armamento.

**DPP** (*Documentação, Planeamento e Programação*) – Setor na estrutura da manutenção da Esquadra 103, da Força Aérea Portuguesa.

**EASA** (*European Aviation Safety Agency*) – Agência Europeia para a Segurança da Aviação. Organização da União Europeia responsável por regular e promover elevados padrões na área da segurança na aviação civil.

**EPE** (*Equipment Periodic Inspection*) – Inspeção periódica programa de 500 horas de voo, respetiva aos motores Alpha Jet.

**ELECTRE** (*Elimination Et Choix Traduisant la Réalité*) - Método de análise multicritério proposto para apoiar as decisões quando analisando problemas complexos.

**FAA** (*Federal Aviation Administration*) – Organização Norte Americana responsável por regulamentar todos os aspetos relativos à aviação civil.

**FAAR** (*Fase Avançada Em Aviões de Reação*) - Fase do curso de pilotagem da aeronave Alpha Jet.

**FAR** (*Federal Aviation Regulations*) – Regras estabelecidas pela FAA reguladoras de todas as atividades relacionadas com a aviação nos Estados Unidos da América.

**FCAC** (*Fase Complementar para Aviões de Combate*) – Fase do curso de pilotagem da aeronave Alpha Jet.

**FMEA** (*Failure Modes and Effect Analysis*) - Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos.

**FMECA** (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis) - Análise dos Modos, Efeitos de Falha e de Criticidade.

**HV** - Horas de Voo.

**HPO** (*Hourly Post Flight Inspection*) – Inspeção periódica programa de 250 horas de voo, respectiva aos motores Alpha Jet.

**ICAO** (*International Civil Aviation Organization*) – Organização das Nações Unidas define os princípios e técnicas da navegação aérea internacional de modo a assegurar a segurança de voo.

**IF** (*Índice de Fadiga*) – Índice representativo dos ciclos ou horas de voo que certas localizações podem ser sujeitas.

**IPP** (*Inspeções Periódicas Programadas*) – Inspeções programadas e integradas no programa de manutenção da aeronave.

**ISC** - Industry Steering Committee.

**LRU** (*Line Replace Unit*) – Rotável modular de uma aeronave desenhado para ser rapidamente substituído ao estado de operação.

**MAUT/MAVT** (*Multi-Attribute Utility/Value Theory*) - Métodos de análise multicritério direcionados para os problemas que envolvem conjuntos finitos e discretos de alternativas, baseados em objetivos conflituosos.

**MCA** - Manual do Comando Aéreo.

**MCDA** (*Multi-criteria Decision Analysis*) – Métodos de Análise Multicritério.

**MDCM** (*Multi-criteria Decision Making*) – Métodos de Apoio à Decisão Multicritério.

**MPD** (*Maintenance Planning Document*) – Documento que fornece as informações de planeamento de manutenção necessárias para que o operador desenvolver o AMP.

**MSI** (*Maintenance-Significant Item*) – Processo de análise ou item cujo modo de falha pode afetar a segurança e ter impacto na operação.

**MRB** (*Maintenance Review Board*) – Comité direcionado para o desenvolvimento e aprovação do programa inicial de uma aeronave.

**MRBR** (*Maintenance Review Board Report*) – Documento que define os requisitos mínimos iniciais da manutenção programada das aeronaves, apoiando o operador no desenvolvimento de um programa de manutenção específico da aeronave.

**MRO** (*Maintenance Repair and Overhaul Organizations*) – Organizações de manutenção na indústria aeronáutica civil.

**MTBF** (*Mean Time Between Failure*) – Tempo médio entre falhas.

**MTTF** (*Mean Time to Failure*) – Tempo médio para a falha.

**MTTR** (*Mean Time to Repair*) – Tempo médio de reparação.

**MWG** - Maintenance Working Groups.

**NAIADE** (*Novel Approach to Imprecise Assessment and Decision Environments*) – Método de análise multicritério cujo objetivo é analisar e selecionar a solução a um problema.

**NASA** (*National Aeronautics and Space Administration*) – Agência espacial Norte Americana.

**OEM** (*Original Equipment Manufacturers*) – Fabricante original do equipamento.

**OVERHAUL** – Revisão Geral, ou seja, inspeção de 3º escalão, a mais profunda dos três escalões.

**PANS** (*Procedures for Air Navigation Services*) – Documentos aprovados pela ICAO que requerem a sua aplicação, de modo a tornar uniforme os serviços de navegação à escala mundial.

**PHASE-OUT** – Descontinuação e/ou fim de operação de um bem.

**PLUS-MGM** (*Plataforma Única de Sistemas de Informação-Módulo de Gestão de Manutenção*) – Plataforma de registo das ações de manutenção das aeronaves na Força Aérea Portuguesa.

**PROMETHEE** (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*) - Método de análise multicritério de apoio à decisão cujo propósito é analisar problemas complexos.

**RCM** (*Reliability Centered Maintenance*) – Manutenção Centrada na Fiabilidade é um processo que determina o que é necessário fazer para assegurar que os bens continuam a desempenhar as suas funções requeridas.

**SAE** (*Society of Automotive Engineers*) – Organização responsável desenvolver os padrões para os profissionais de engenharia de várias indústrias, com maior ênfase na indústria de transportes.

**SAR** (*Search And Rescue*) – Operações de busca e salvamento.

**SARPs** (*Standards and Recommended Practices*) – Documentos com práticas recomendadas, pela ICAO, para uniformizar a gestão dos riscos de segurança na aviação.

**SB** (*Service Bulletins*) – Documentos utilizados pelos fabricantes de aeronaves cujo propósito é comunicar com os operadores os detalhes das modificações a executar.

**SFIP** (*Supplemental Fatigue Inspection Program*) – Programa de extensão de vida de fadiga da aeronave Alpha Jet.

**SP** (*Special Inspections*) - Inspeções especiais segundo uma condição.

**SSI** (*Significant Structural Items*) – Inspeções Itens Estruturais Significativos na Força Aérea Portuguesa.

**SWOT** (*Strenghts, Weaknesses, Opportunities, and Threats*) – Método de planeamento que avalia quatro elementos de uma organização, de modo a atingir um objetivo.

**TOPSIS** (*The Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution*) - Método de análise multicritério desenhado para encontrar a solução mais ideal.

**TPM** (*Total Productive Maintenance*) – Manutenção Produtiva Total é um sistema desenvolvido para eliminar perdas, reduzir paragens, aumentar a qualidade e diminuir custos nas organizações.



# Índice

1. Introdução .....	1
1.1. Justificação e motivação.....	2
1.2. Objetivo(s) do Estudo.....	3
1.3. Metodologia .....	4
1.4. Estrutura da Dissertação.....	5
2. Gestão da Manutenção .....	7
2.1. Tipos de Disponibilidade .....	8
2.1.1. Disponibilidade Intrínseca.....	9
2.1.2. Disponibilidade Operacional.....	10
2.2. Manutenção .....	10
2.2.1. Objetivos da Manutenção.....	11
2.2.2. Evolução Histórica .....	12
2.2.3. Estratégias de Manutenção.....	13
2.3. Manutibilidade .....	17
2.4. Fiabilidade.....	18
2.4.1. Curvas de Mortalidade .....	21
2.4.2. Métodos de Avaliação da Condição dos Ativos no Período de Degradação.....	24
2.5. Manutenção Centrada na Fiabilidade (RCM) .....	28
2.5.1. Origem do RCM.....	29
2.5.2. Questões Essenciais RCM.....	31
2.5.3. Objetivos RCM .....	33
2.5.4. Implementação do Modelo RCM.....	34
2.5.5. Benefícios da Implementação RCM.....	35
2.6. Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA).....	36
2.6.1. Objetivos .....	37
2.6.2. Origens .....	37
2.6.3. Áreas de Aplicação.....	38
2.6.4. Tipos de FMEA.....	39
2.6.5. Implementação da FMEA .....	41
2.6.6. Exemplo de Aplicação FMEA .....	47
2.6.7. Vantagens FMEA.....	50
2.6.8. Limitações FMEA .....	51
2.7. Papel do Planeamento de Manutenção.....	52
2.8. Nível Organizacional de Manutenção do Modelo Proposto.....	55
3. Métodos de Tomada de Decisão .....	57

3.1.	Métodos de Apoio à Decisão Multicritério .....	58
3.1.1.	Métodos Elementares .....	58
3.1.2.	Métodos de Análise de Decisão Multicritério .....	59
3.3.	Método AHP .....	65
3.3.1.	Vantagens do AHP .....	66
3.3.2.	Implementação da metodologia AHP.....	67
3.3.3.	Exemplo de Aplicação AHP .....	71
3.3.4.	Limitações do AHP .....	74
3.4.	TOPSIS .....	75
3.4.1.	Vantagens do TOPSIS.....	75
3.4.2.	Implementação da metodologia TOPSIS .....	76
3.4.3.	Exemplo de Aplicação TOPSIS .....	78
3.4.4.	Limitações do TOPSIS.....	83
4.	Modelo de Suporte à Decisão na Gestão Estratégica da Condição de Ativos (MSD - GECA) .....	85
4.1.	Ferramentas aplicáveis nas etapas do Modelo MSD - GECA.....	86
4.2.	Etapas de aplicação do MSD- GECA.....	89
4.2.1.	Atribuição de Ferramentas ao MSD- GECA.....	90
5.	Caso de Estudo - Aplicação do Modelo Proposto na Indústria de Manutenção Aeronáutica .....	95
5.1.	Planeamento de Manutenção em Organizações de Manutenção Aeronáutica.....	95
5.1.1.	Planeamento e Controlo de Manutenção.....	96
5.1.2.	MSG-3 e RCM .....	97
5.1.3.	Maintenance Review Board Report .....	101
5.1.4.	Maintenance Planning Document .....	102
5.1.5.	Níveis de Manutenção.....	103
5.1.6.	Regulamentos de Manutenção Aeronáutica .....	106
5.1.7.	Manutenção Aeronáutica Militar .....	107
5.2.	Caraterização do Caso de Estudo .....	109
5.2.1.	Sistema de Armas Dassault-Dornier Alpha Jet.....	110
5.2.2.	Manutenção da Esquadra 103.....	111
5.3.	Aplicação do Modelo de Suporte à Decisão na Gestão Estratégica da Condição de Ativos (MSD - GECA).....	114
6.	Conclusões e Recomendações .....	155
	Bibliografia.....	157
	Anexo A – Programa de Manutenção da Aeronave Alpha Jet .....	173
	Anexo B – Planeamento de Preservação da Frota Alpha Jet.....	175



## Índice de Figuras

Figura 1. 1 - Árvore de Decisão dos cenários de Avaliação de Operacionalidade.....	3
Figura 1. 2 - Metodologia da elaboração da dissertação .....	4
Figura 2. 1- Fatores influenciadores da disponibilidade operacional dos bens .....	8
Figura 2. 2 - Evolução Histórica da Eficiência da Manutenção .....	13
Figura 2. 3 - Estratégias de Manutenção .....	14
Figura 2. 4 - Relação entre valores de MTTR e Manutibilidade.....	18
Figura 2. 5 - Exemplo de Fiabilidade e Probabilidade de Falha .....	19
Figura 2. 6 - Diferentes períodos da Curva da Banheira .....	22
Figura 2. 7 – Modelos de Degradação baseados na Fiabilidade.....	24
Figura 2. 8 – Curva da Banheira com extensão do ciclo de vida .....	27
Figura 2. 9 - Tipos de FMEA .....	40
Figura 2. 10 - Fluxograma Implementação FMEA .....	42
Figura 2. 11 - Sequência Tiragem de Café.....	48
Figura 2. 12 - Constituição do Planeamento de Manutenção .....	53
Figura 2. 13 - Níveis Organizacionais de Manutenção por Objetivos .....	54
Figura 2. 14 - Tipologia de avaliação criterial nos diferentes níveis organizacionais.....	56
Figura 3. 1 - Os Métodos de Análise Multicritério mais utilizados .....	60
Figura 3. 2 - Diagrama de aplicação dos Métodos de Análise Multicritério.....	62
Figura 3. 3 - Exemplo de Estrutura Hierárquica Básica.....	71
Figura 4. 1 - Etapas do MSD - GECA de Planeamento de Manutenção.....	85
Figura 4. 2 - Pilares do Modelo de Planeamento de Manutenção MSD - GECA .....	89
Figura 4. 3 – Correlação entre os Níveis Organizacionais e os Pilares do MSD- GECA .....	90
Figura 4. 4 – Representação Esquemática do Diagrama Causa-Efeito ou Ishikawa.....	91
Figura 4. 5 – Ilustração de ferramentas atribuídas ao MSD - GECA.....	93
Figura 5. 1 - Processo RCM vs Processo MSG-3 .....	100
Figura 5. 2 -Classificação Organizacional das MRO .....	103
Figura 5. 3 - Caraterísticas/Capacidades da Aeronave Alpha Jet .....	110
Figura 5. 4 - Funções de manutenção da Esquadra 103 .....	111
Figura 5. 5 - Estrutura de Manutenção da Esquadra 103 .....	112
Figura 5. 6 - Regime de Esforço Anual da Esquadra 103 .....	114
Figura 5. 7 –Diagrama Causa-Efeito aplicado ao Caso de Estudo.....	115
Figura 5. 8 - WS54/55: Furações das secções de encastramento das asas na fuselagem .....	116
Figura 5. 9 - FS27 BH30: Zona da fuselagem de encastramento da asa .....	116
Figura 5. 10 - HV disponíveis por Aeronave (janeiro 2018) até IF 150% .....	117
Figura 5. 11 - Vista frontal do Motor Larzac 04 C20.....	118
Figura 5. 12 - Módulos constituintes do Motor Larzac 04 C20 .....	119
Figura 5. 13 - Quantitativo Avarias Anuais (2010 - 2016).....	120
Figura 5. 14 - Estrutura Hierárquica de Decisão de avaliação da Extensão de Operacionalidade .....	140
Figura 5. 15 - Árvore de decisão AHP .....	147



## Índice de Tabelas

Tabela 2. 1 - Os seis padrões de falhas .....	23
Tabela 2. 2 – FMEA: Critérios de avaliação da Severidade.....	45
Tabela 2. 3 - FMEA: Critérios de avaliação da Ocorrência .....	46
Tabela 2. 4 - FMEA: Critérios de avaliação da Detecção.....	46
Tabela 2. 5 - Exemplo aplicação FMEA .....	49
Tabela 3. 1- Ferramentas de análise multicritério complementadas à FMEA.....	63
Tabela 3. 2 - Quadro síntese de critérios de escolha AHP e TOPSIS .....	65
Tabela 3. 3 - Escala Numérica de Saaty.....	67
Tabela 3. 4 - Valores do Índices de Consistência.....	70
Tabela 3. 5 - Comparações Par a Par .....	71
Tabela 3. 6 -Somatório de Colunas .....	72
Tabela 3. 7 - Matriz Normalizada .....	72
Tabela 3. 8 - Vetor de Prioridade Principal ( $C_i$ ) .....	72
Tabela 3. 9 - Comparações C1 .....	72
Tabela 3. 10 - Comparações C2 .....	72
Tabela 3. 11 - Comparações C3 .....	73
Tabela 3. 12 - Comparações C4 .....	73
Tabela 3. 133 - Escala de Atributos Criterial .....	78
Tabela 3. 14 - Elementos da Matriz de Decisão $D^k$ .....	79
Tabela 3. 15 - Matriz de Decisão Normalizada $R^k$ .....	79
Tabela 3. 16 - Matriz de Decisão Ponderada-Normalizada $V^k$ .....	80
Tabela 3. 17 - Escolha PIS na Matriz de Decisão Ponderada-Normalizada .....	80
Tabela 3. 18 - Escolha NIS na Matriz de Decisão Ponderada-Normalizada.....	80
Tabela 3. 19 - PIS na Matriz de Decisão Ponderada-Normalizada .....	81
Tabela 3. 20 - Pontos PIS .....	81
Tabela 3. 21 - NIS na Matriz de Decisão Ponderada-Normalizada .....	82
Tabela 3. 22 - Pontos NIS .....	82
Tabela 3. 23 - Coeficientes de Aproximação .....	82
Tabela 3. 24 – AHP vs TOPSIS .....	83
Tabela 4. 1 - Ferramentas de identificação de risco .....	87
Tabela 4. 2 - Ferramentas análise de risco mais utilizadas na manutenção .....	88
Tabela 5. 1 - Número de IPP até ao IF 150% .....	118
Tabela 5. 2 - Avarias de Motores registadas em PLUS-MGM nos períodos de 01JAN2010 a 31AGO2014 e de 01JAN2015 a 31DEZ2016.....	122
Tabela 5. 3 - Índice de Severidade aplicada ao Caso de Estudo .....	124
Tabela 5. 4 - Índice de Ocorrência aplicada ao Caso de Estudo .....	125
Tabela 5. 5 - Índice de Detecção aplicada ao Caso de Estudo .....	125
Tabela 5. 6 - Classificação RPN aplicada ao Caso de Estudo.....	126
Tabela 5. 7 - FMEA Módulo 1.....	127
Tabela 5. 8 - FMEA Módulo 2.....	128
Tabela 5. 9 - FMEA Módulo 3.....	129
Tabela 5. 10 - FMEA Módulo 4.....	131
Tabela 5. 11 - FMEA Módulo 5.....	132
Tabela 5. 12 - FMEA Módulo 6.....	133
Tabela 5. 13 - FMEA Módulo 7.....	134
Tabela 5. 14 - FMEA Módulo 8.....	135

Tabela 5. 15 - Resumo FMEA classificação RPN's .....	137
Tabela 5. 16 - Ações recomendadas para os RPN mais críticos .....	138
Tabela 5. 17 - Comparações Par a Par do Caso de Estudo.....	142
Tabela 5. 18 - Somatório de Colunas .....	142
Tabela 5. 19 - Matriz Normalizada .....	142
Tabela 5. 20 - Vetor de Prioridade Principal ( $C_i$ ).....	143
Tabela 5. 21 - Comparações C1 .....	143
Tabela 5. 22 - Comparações C2 .....	143
Tabela 5. 23 - Comparações C3 .....	143
Tabela 5. 24 - Comparações C4 .....	144
Tabela 5. 25 – Comparações C5.....	144
Tabela 5. 26 - Vetor Único cada Alternativa em relação ao Objetivo Global.....	144
Tabela 5. 27 - Vetor de Consistência .....	145
Tabela 5. 28 - Valores do Índices de Consistência.....	146
Tabela 5. 29 - Resumo AHP.....	148
Tabela 5. 30 - Escala de Atributos Criterial .....	149
Tabela 5. 31 - Elementos da Matriz de Decisão $D^k$ .....	149
Tabela 5. 32 - Matriz de Decisão Normalizada $R^k$ .....	150
Tabela 5. 33 - Matriz de Decisão Ponderada-Normalizada $V^k$ .....	150
Tabela 5. 34 - Pontos PIS na Matriz de Decisão Ponderada-Normalizada .....	151
Tabela 5. 35 - Pontos NIS na Matriz de Decisão Ponderada-Normalizada.....	151
Tabela 5. 36 - Coeficientes de Aproximação .....	152
Tabela 5. 37 - Resultados AHP vs TOPSIS .....	152
Tabela 5. 38 - Dados AHP da Opção Venda.....	153
Tabela A. 1 – Inspeções Periódicas Programadas de Célula.....	173
Tabela A. 2 – Inspeções Especiais da Aeronave Alpha Jet.....	173
Tabela A. 3 – Inspeções Periódicas Programadas de Motores .....	173
Tabela B. 1 – Listagem e preçário do planeamento de preservação Alpha Jet .....	187

## 1. Introdução

Atualmente, com a recessão que se verifica nas economias, as empresas, fazendo face à globalização e grande competitividade dos mercados, procuram métodos que lhes garantam maiores vantagens competitivas (Abreu *et al.*, 2015a). É nestes termos que a manutenção tem vindo a ganhar um papel de maior importância nas organizações. A manutenção tem como objetivo principal a rentabilidade da organização, através do aumento da eficácia de manutenção, mais propriamente o aumento de disponibilidade, aumento de fiabilidade, aumento de qualidade, aumento de segurança pessoal e diminuição dos tempos de paragem (Muchiri *et al.*, 2011; Arslankaya *et al.*, 2015).

Na indústria aeronáutica os padrões de segurança são o fator preponderante, assentando estes em estratégias e procedimentos de manutenção adequados. E, ao tratar-se de uma indústria onde os custos de operação e manutenção são milionários, o conceito *lean* torna-se bastante importante na redução de tarefas que não acrescentam valor, apelidado de desperdício, garantindo assim uma maior eficácia de manutenção, minimização dos custos inerentes à manutenção, permitindo, assim, obter uma melhoria do desempenho da organização. (Hines *et al.*, 2004; Smith e Hawkins, 2004; Abreu *et al.*, 2015a).

Já do ponto de vista da exploração de aeronaves, em termos de planeamento de manutenção, a fiabilidade é uma variável bastante eficaz de análise da probabilidade de adequabilidade de funcionamento de componentes e sistemas (Pintelon e Van Puyvelde, 2006), garantindo os elevados padrões de segurança (Kinnison, 2012), permitindo assim melhorar a gestão de manutenção das aeronaves. Contudo, devido à escassez de recursos, torna-se bastante importante otimizar a eficácia da manutenção (Smith e Hawkins, 2004), ou seja, definir uma estratégia de manutenção mais próxima do ideal, para cada sistema e componentes, já que na indústria aeronáutica, a componente manutenção é cerca de 13% do custo operacional de uma companhia aérea (Berrittella *et al.*, 2009).

A manutenção centrada na fiabilidade torna-se uma metodologia de planeamento ideal, eficiente e rentável para colmatar esta lacuna. Sendo que, na indústria aeronáutica a metodologia utilizada no desenvolvimento de programas de manutenção eficazes com o objetivo de maximizar a fiabilidade dos bens, é chamado de MSG-3 (*Maintenance Steering Group-3*), esta metodologia incorpora os princípios do RCM (Manutenção Centrada na Fiabilidade), podendo mesmo serem vistas como semelhantes (Ahmadi *et*

*al.*, 2010a). As duas metodologias utilizam ferramentas de análise de risco aos bens, identificando aqueles mais suscetíveis à falha, em particular, a ferramenta MSI (*Maintenance-Significant Items*), no MSG-3, e a ferramenta FMEA (Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos), no RCM. Mais particularmente, a FMEA permite a análise e avaliação do risco dos efeitos das falhas ao longo dos sistemas (EN 60812, 2006). Permite, também, a identificação de meios de prevenção e detecção dos modos de falha, de modo a serem identificadas as tarefas de minimização/mitigação dos efeitos de falha, diminuindo o risco desses efeitos (Silva *et al.*, 2006; Stamatis, 2003).

No entanto, para uma avaliação a nível estratégico de uma organização, em termos de exploração de aeronaves, torna-se necessário existir uma tomada de decisão eficaz (Loken, 2007; Guitouni e Martel, 1998) e baseada em vários factos ou critérios, que a detecção de modos de falha e identificação das ações de correção nem sempre é capaz de fornecer. Pois bem, a existência dos métodos MCDA (Métodos de Análise Multicritério) é justificada com o propósito de dotar uma decisão complexa, baseada em vários critérios, de uma maior transparência e clareza (Ishizaka e Nemery, 2013; Marins *et al.*, 2009), de modo a que possa, essa decisão, ser tomada mais próxima da ideal.

Neste contexto, com base na teoria de decisões complexas, que possibilitam uma avaliação de diferentes possibilidades de criação de valor, em termos de planeamento de manutenção, a uma frota de aeronaves, baseando-se em diferentes critérios, alguns dos quais obtidos pela ferramenta FMEA, a presente dissertação propõe o desenvolvimento um modelo de suporte à decisão utilizando uma abordagem multicritério com o objetivo de seleccionar a melhor alternativa ao destino final da frota Alpha Jet, da Força Aérea Portuguesa, avaliando a possível extensão da sua operacionalidade ou de diferentes cenários para a sua utilização.

## **1.1. Justificação e motivação**

A Força Aérea Portuguesa, neste momento, está em regime de “Phase-Out” do sistema de armas Alpha Jet, até início de 2018. A frota deixará de voar a partir dessa data, muito devido aos cortes orçamentais que se têm sentido ao longo dos anos, mas assentando na decisão da Força Aérea Portuguesa de por um fim à frota.

O tema em questão surge da necessidade de planear o fim da frota, por parte da Força Aérea Portuguesa, que neste momento não terá uma solução definida, no entanto existem propostas que passam pela sua substituição ou modernização, não estando, até ao momento, definida uma solução.

Colocam-se assim algumas questões relevantes: será possível o prolongamento de operacionalidade no período de degradação? Quais os componentes críticos a serem intervencionados? Por que critérios pode esta avaliação de prolongamento de operacionalidade ser estudada? Em caso do não prolongamento, qual será o destino dos meios aéreos?

É neste contexto e por exercer funções na Manutenção da Esquadra 103, que é proposto o desenvolvimento de um modelo de suporte à decisão utilizando uma abordagem multicritério para criação de valor, em termos de planeamento de manutenção, avaliando as diferentes alternativas para uma possível solução final, entre elas a extensão da operacionalidade das aeronaves Alpha Jet, da Força Aérea Portuguesa.

## 1.2. Objetivo(s) do Estudo

A presente dissertação tem como objetivo principal desenvolver um modelo de suporte à decisão utilizando uma abordagem multicritério com o intuito de criar valor, em termos de planeamento de manutenção, avaliando a extensão da operacionalidade de bens no seu período de degradação, com preponderância na indústria aeronáutica, bem como, a descrição da metodologia e aplicação às aeronaves Alpha Jet, da Força Aérea Portuguesa. No entanto, esta avaliação de extensão de operacionalidade deverá abordar os diferentes cenários, caso haja ou não possibilidade de prolongamento de operacionalidade. Na Figura 1.1, são ilustradas as diferentes opções desta avaliação:

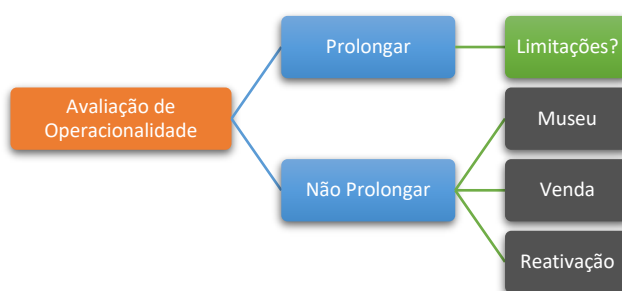


Figura 1. 1 - Árvore de Decisão dos cenários de Avaliação de Operacionalidade

A avaliação de operacionalidade, a ser desenvolvida neste trabalho de investigação, terá de analisar os cenários de prolongamento e o não prolongamento de operacionalidade da frota de aeronaves. No caso de prolongamento de operacionalidade, as questões a deporem-se são: até quando é estimado esse prolongamento? Quais os custos, estimados, inerentes ao prolongamento? Quais as aeronaves que poderão chegar até ao fim do prolongamento de operacionalidade? Após o final desta extensão, o que fazer?

Explorando a hipótese do não prolongamento, existem três cenários possíveis, a exposição dos meios aéreos em museu, a venda dos meios aéreos e a reativação dos mesmos. Nestes três cenários, este trabalho de investigação, propõe o desenvolvimento de um planeamento de preservação da frota Alpha Jet. No cenário de exposição para museu, este planeamento de preservação será executado com o propósito de minimizar ao máximo a degradação ou perda do património nacional. Nos dois últimos cenários, de venda e reativação, o planeamento de preservação da frota, no caso de venda, será com o intuito de preservar os seus constituintes e a respetiva fiabilidade para poder maximizar o lucro, no caso de reativação dos meios ao seu estado operacionalidade, o planeamento de preservação é executado com o objetivo de reduzir ao máximo o esforço de manutenção da reativação.

### 1.3. Metodologia

A metodologia utilizada na elaboração da presente dissertação é caracterizada pelo encadeamento das seguintes ações, representadas na Figura 1.2 seguinte.

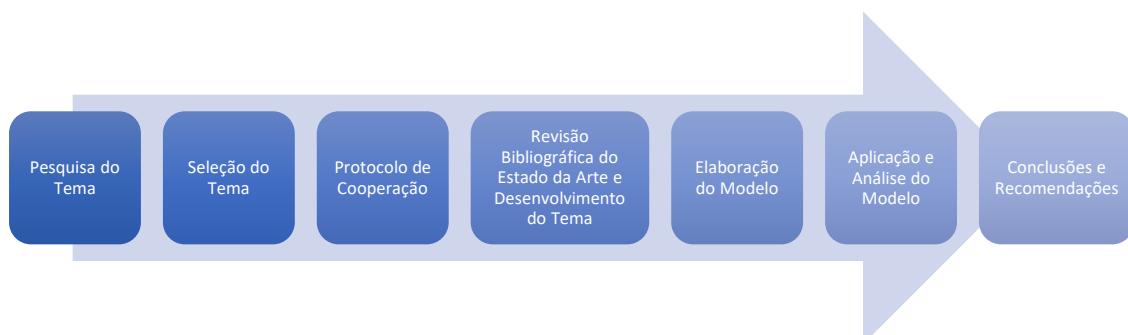


Figura 1. 2 - Metodologia da elaboração da dissertação



A elaboração do presente trabalho de investigação foi iniciada com a pesquisa do tema, conseguido a partir da pesquisa bibliográfica dos vários formatos, devidamente citada, e discriminada na Bibliografia. Como fontes de pesquisa, foram utilizadas as bases de dados Web Of Science, B-On, Science Direct, Google Académico e a ProQuest, incluindo também como fontes bibliográficas, artigos científicos, revistas, livros e dissertações de mestrado.

A pesquisa bibliográfica serviu não só para aquisição de conhecimento já existente, mas também para ajudar na formulação de novas ideias.

Após a seleção do tema, foi elaborado um protocolo de cooperação com a Força Aérea Portuguesa, de maneira a ser possível o desenvolvimento do trabalho de investigação.

Com base na revisão bibliográfica sobre o tema em questão, foi desenvolvido o tema, elaborado o modelo proposto de planeamento de manutenção e, por fim, procedeu-se à sua aplicação e análise de resultados.

#### **1.4. Estrutura da Dissertação**

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos, visando um encadeamento lógico da investigação efetuada.

O **Primeiro Capítulo – Introdução**: de carácter introdutório, pretende enquadrar o leitor com o tema a desenvolver.

O **Segundo Capítulo – Gestão da Manutenção**: procura estudar as variantes que poderão influenciar a disponibilidade dos bens, desde a manutenção, manutibilidade e fiabilidade. Pretende descrever, também, a abordagem RCM e respetiva ferramenta de análise de risco.

O **Terceiro Capítulo – Métodos de Tomada de Decisão**: têm o objetivo de explicar os métodos de apoio à decisão, baseados em diferentes critérios, que permitam criar um processo de tomada de decisão mais eficiente, mas também detalhar a sua aplicação e a razão da sua escolha.

O **Quarto Capítulo – Modelo de Suporte à Decisão na Gestão Estratégica da Condição de Ativos (MSD - GECA)**: descreve, por passos, a metodologia de aplicação do modelo proposto para criação de valor, em termos de planejamento de manutenção. Descreve também, quais as ferramentas em cada etapa do Modelo e o porquê de estas serem utilizadas.

O **Quinto Capítulo – Caso de Estudo - Aplicação do Modelo Proposto na Indústria de Manutenção Aeronáutica**: neste capítulo é caracterizada a área de implementação do Modelo proposto, abordando a existência do RCM na manutenção na indústria aeronáutica, descrevendo como é desenvolvido um programa de manutenção de aeronaves e quais os níveis de intervenção de manutenção. Por fim, é então aplicada a metodologia do modelo proposto ao caso de estudo, que consiste na caracterização do objeto de estudo, implementação do modelo proposto e respectivos resultados.

O **Sexto Capítulo – Conclusões e Recomendações**: apresenta as conclusões sobre a dissertação desenvolvida e, mais especificamente, sobre o estudo de caso e respectivas recomendações.

## 2. Gestão da Manutenção

A degradação de bens e de condições de funcionamento é algo inerente ao ciclo de vida de todos os sistemas e equipamentos mecânicos, hidráulicos, elétricos ou pneumáticos, comprometendo assim a sua disponibilidade de operação, ou seja, afetando o desempenho da sua função requerida com a eficácia e eficiência desejadas. Apesar deste normal desgaste e estado de deterioração, quando os equipamentos são obrigados a funcionar para lá dos seus limites, sem uma estratégia definida, outras falhas poderão ocorrer.

A gestão de ativos é assim um processo que incorpora as fases de identificação, projeto, fabrico, operação e manutenção, sendo o gestor de ativos aquele que controla a condição dos equipamentos e programa as intervenções de manutenção (Faiz e Edirisinghe, 2009), torna-se, então, indispensável a função manutenção, e sua adequação de aplicação ao caso específico, possibilitando assim a diminuição ou mesmo mitigação da probabilidade de ocorrência de falhas.

Uma boa manutenção é definida por dois critérios, segundo Niu *et al.* (2010), a relação custo-efetividade e precisão, pois a redução do custo de manutenção poderá aumentar os lucros de uma organização, enquanto uma manutenção precisa e rigorosa poderá manter a fiabilidade dos equipamentos. Segundo Arslankaya *et al.* (2015), uma manutenção só poderá ser eficaz e competente se trabalhar para a redução do desperdício e aumento da qualidade dos trabalhos, permitindo assim a redução dos custos de manutenção, aumento da produtividade da manutenção e, por consequência, diminuir o esforço de manutenção.

De referir então que, a manutenção tem vindo a ganhar cada vez mais importância, na competitividade das organizações, como função essencial de suporte assegurando a disponibilidade de equipamentos, a qualidade de produtos, a segurança das instalações e os tempos de entrega (Niu *et al.*, 2010).

É neste contexto que, e devido ao tema do presente trabalho de investigação, o presente capítulo tem como principal objetivo estudar as variantes que poderão influenciar a disponibilidade operacional de um bem.

## 2.1. Tipos de Disponibilidade

A disponibilidade, segundo a NP EN 13306 (2007); Tont *et al.* (2008); Abreu *et al.* (2016), é a aptidão de um bem para desempenhar a sua função requerida num dado instante ou durante um dado intervalo de tempo, sob determinadas condições.

Esta disponibilidade não é infinita, pois os bens (componentes e sistemas reparáveis) necessitam de intervenções de manutenção para manter a sua fiabilidade e desempenho de função requerida ao longo do seu ciclo de vida, originado assim tempos de imobilização que, dependendo da causa de imobilização, manutenção planeada ou não planeada (avarias), serão tanto maiores ou menores.

O desempenho da função requerida de um bem dependerá, portanto, da sua fiabilidade e disponibilidade, mas também da eficiência de manutenção, do ambiente de operação e do operador, em termos do tipo de operação e das competências técnicas da manutenção (Tont *et al.*, 2008).

No entanto, para o caso em concreto, é necessário estudar os elementos que influenciam a disponibilidade de operação dos bens, ou seja, a disponibilidade operacional. A Figura 2.1, representa os fatores externos que influenciam a disponibilidade operacional dos bens, para além das suas propriedades:

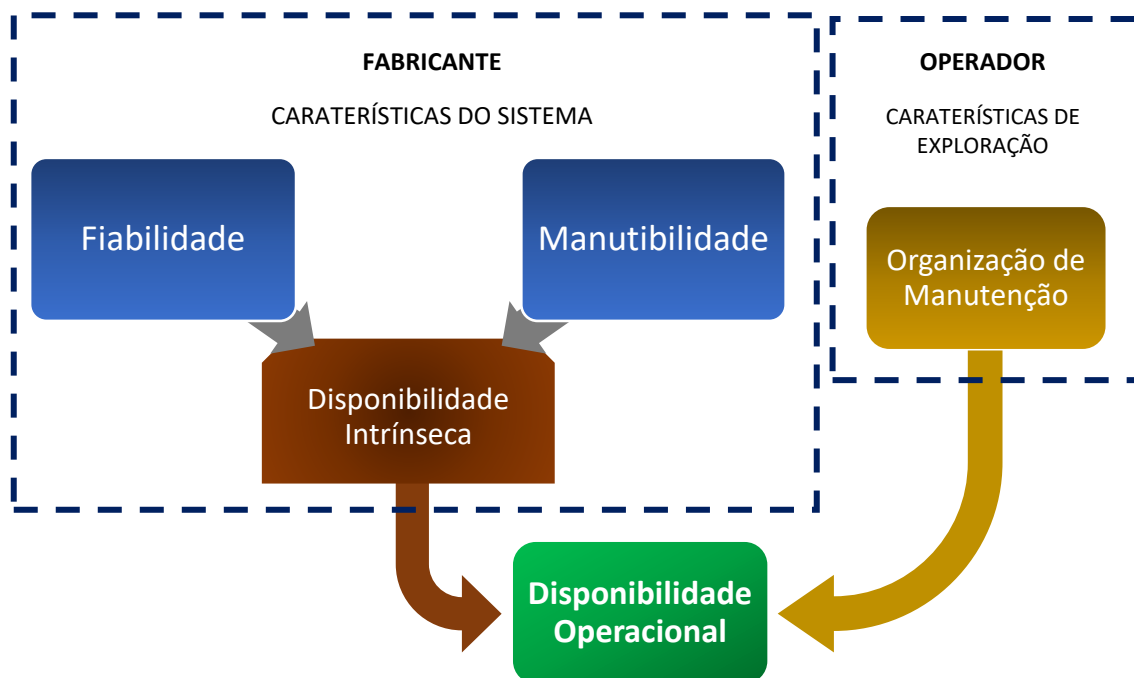


Figura 2. 1- Fatores influenciadores da disponibilidade operacional dos bens (adaptado de Bussel e Zaaier, 2001; Szkoda, 2014)

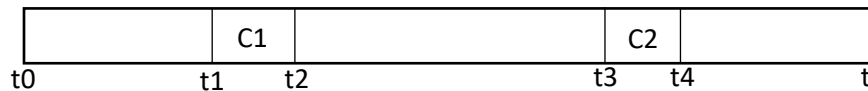
Através da análise da Figura 2.1, é possível concluir que a disponibilidade operacional dos bens depende apenas de duas variáveis, das propriedades intrínsecas de fábrica e da variável de exploração (externa). As características intrínsecas de fábrica, ou seja, a sua disponibilidade intrínseca, é imposta pela fiabilidade (probabilidade de não falhar) e manutibilidade (facilidade de reparação) do bem ou sistema (Piedade e Abreu, 2017). Segundo Moubray (1997), esta disponibilidade intrínseca será maior que a disponibilidade operacional, no entanto, o operador, ou seja, a organização de manutenção, pode ajudar na maximização da disponibilidade operacional com a sua política de manutenção.

### 2.1.1. Disponibilidade Intrínseca

A disponibilidade intrínseca, resultante da taxa de avarias, de um bem, determinada em fase de projeto, é definida entre as variáveis do tempo médio de reparação e pelo tempo médio entre falhas (Houssin e Coulibaly, 2014; Tont *et al.*, 2008). A primeira variável depende diretamente da manutibilidade do bem. A segunda variável depende diretamente da fiabilidade.

Esta vertente de disponibilidade representa a probabilidade de um bem, quando utilizado sob determinadas condições ideais de operação, de desempenhar adequadamente a sua função requerida, excluindo a manutenção preventiva ou programada (Tont *et al.*, 2008; Savsar *et al.*, 2012).

Considerando um período de tempo onde um bem é submetido, unicamente, a ações de manutenção corretiva, C1 e C2:



Segundo Tont *et al.* (2008) e Savsar *et al.* (2012):

$$Di = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (2.1)$$

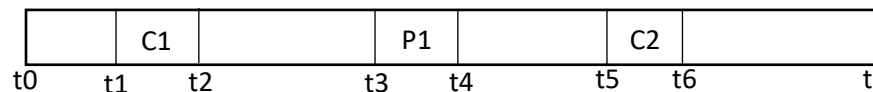
$$MTBF - \text{tempo médio entre avarias} = \frac{(t1 - t0) + (t3 - t2) + (t - t4)}{3}$$

$$MTTR - \text{tempo médio de reparação} = \frac{(t2 - t1) + (t4 - t3)}{2}$$

## 2.1.2. Disponibilidade Operacional

A disponibilidade operacional representa a probabilidade de um bem, sob determinadas condições reais de operação, de desempenhar satisfatoriamente a sua função requerida (Tont *et al.*, 2008; Savsar *et al.*, 2012). É, então, definida entre as variáveis do tempo médio entre ações de manutenção e do tempo médio de paragem para ações de manutenção, incluindo todas as ações de manutenção corretivas e preventivas (Houssin e Coulibaly, 2014; Nenni, 2013; Tont *et al.*, 2008). Em que a primeira variável corresponderá à fiabilidade e a segunda variável à manutibilidade, mas também à gestão de manutenção.

Considerando um período de tempo onde um bem é submetido a ações de manutenção corretiva, C1 e C2, e ações de manutenção preventiva, P1:



Segundo Nenni (2013); Tont *et al.* (2008); Savsar *et al.* (2012):

$$\text{Disponibilidade Operacional} = Do = \frac{MTBM}{MTBM+MDT} \quad (2.2)$$

*MTBM* – tempo médio entre ações de manutenção

$$= \frac{(t1 - t0) + (t3 - t2) + (t5 - t4) + (t - t6)}{4}$$

*MDT* – tempo médio de paragem para ações de manutenção

$$= \frac{(t2 - t1) + (t4 - t3) + (t6 - t5)}{3}$$

## 2.2. Manutenção

De acordo com a norma NP EN 13306 (2007), a manutenção define-se 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 repô-lo num estado em que ele pode desempenhar a função requerida”.

Segundo Pintelon e Van Puyvelde (2006) o conceito de manutenção define-se como a combinação de todas as atividades necessárias a manter os equipamentos, instalações e outros bens físicos em condições ótimas (requeridas) de operação ou restaurá-las a estas condições (Cabral, 2006), garantindo estes bens são intervencionados em tempo oportuno, evitando a sua avaria ou quebra no rendimento.

No âmbito da manutenção aeronáutica, Kinnison (2012) e Lee *et al.* (2008), definem manutenção como sendo um processo de assegurar que um sistema desempenha, continuamente, a sua função requerida, segundo os níveis de fiabilidade e segurança para os quais foi projetado. Já a FAA, no documento FAR Part 1, define a manutenção pelas inspeções, revisões gerais, reparações, preservação e substituição de componentes (Kinnison, 2012).

### **2.2.1. Objetivos da Manutenção**

A manutenção tem um carácter cada vez mais preponderante na competitividade das empresas ao nível da qualidade, redução de custos, segurança das pessoas e meio ambiente, que beneficiam o crescimento da empresa. Ou seja, um dos principais objetivos da manutenção será a rentabilidade da organização, e para que isso aconteça terá de se encontrar o ponto de equilíbrio entre o custo e o benefício da manutenção (Cabral, 2006; Abreu *et al.*, 2015b).

Para Takata *et al.* (2004); Horenbeek e Pintelon (2014); Abreu *et al.* (2016), a manutenção, combinando ações técnicas e administrativas, tem como objetivo a preservação tanto da condição dos produtos como das suas funções requeridas com os níveis adequados de fiabilidade, disponibilidade, operabilidade e segurança, ao longo do seu ciclo de vida.

Segundo Muchiri *et al.* (2011) e Arslankaya *et al.* (2015), os objetivos da manutenção são determinados por assegurar:

- Aumento do índice de disponibilidade dos bens;
- Funcionalidade das instalações (disponibilidade, fiabilidade, qualidade do produto);
- Garantia das condições de segurança dos operadores dos equipamentos;

- Redução do volume de manutenção e dos custos inerentes;
- Estender o ciclo de vida de qualquer equipamento e/ou máquina e assegurar um maior rendimento de capital.

Precisamente neste último ponto, Al-Najjar e Alsyouf (2003) afirmam que para existir uma maior taxa de exploração do ciclo de vida de um bem têm, também, que as intervenções de manutenção ocorrer no tempo certo, reduzindo assim, por consequência, o número de falhas, o tempo de intervenção para reparação de falha, custos diretos de manutenção e os custos de produção.

Por sua vez, Kinnison (2012) faz a distinção entre metas e objetivos na manutenção aeronáutica. Sendo que, as metas focam-se em manter as aeronaves em estado de aeronavegabilidade (segurança e fiabilidade), de modo a que possam cumprir a sua missão, mas também deverá manter os níveis de qualidade e disponibilidade do produto (Vieira e Loures, 2016). Já os objetivos, as atividades desenvolvidas de modo a atingir as metas propostas, são os seguintes (Ahmadi *et al.*, 2010a; Kinnison, 2012):

- Assegurar que os equipamentos estão nos níveis fiabilidade e segurança para os quais foram projetados;
- Restabelecer os níveis de fiabilidade e segurança caso ocorra a sua deterioração;
- Melhoramento do programa de manutenção, quando os níveis de fiabilidade e segurança não estejam a ser atingidos;
- Desenvolvimento melhorado de bens, na fase projeto, caso os níveis de fiabilidade não sejam os adequados;
- Atingir estes objetivos ao mínimo custo total (custos de manutenção e de falhas residuais).

### **2.2.2. Evolução Histórica**

Desde os primórdios da manutenção, cujo conceito de manutenção era puramente reativo à ocorrência de falhas, até aos dias de hoje em que uma das grandes preocupações é a eficiência de manutenção, com tal é ilustrado na Figura 2.2, tem ocorrido nas últimas décadas uma significativa evolução das mais variadas técnicas e abordagens de manutenção com o propósito de melhorar a sua eficiência (Dowlatshahi, 2008; Misra, 2008; Al-Najjar e Alsyouf, 2003):



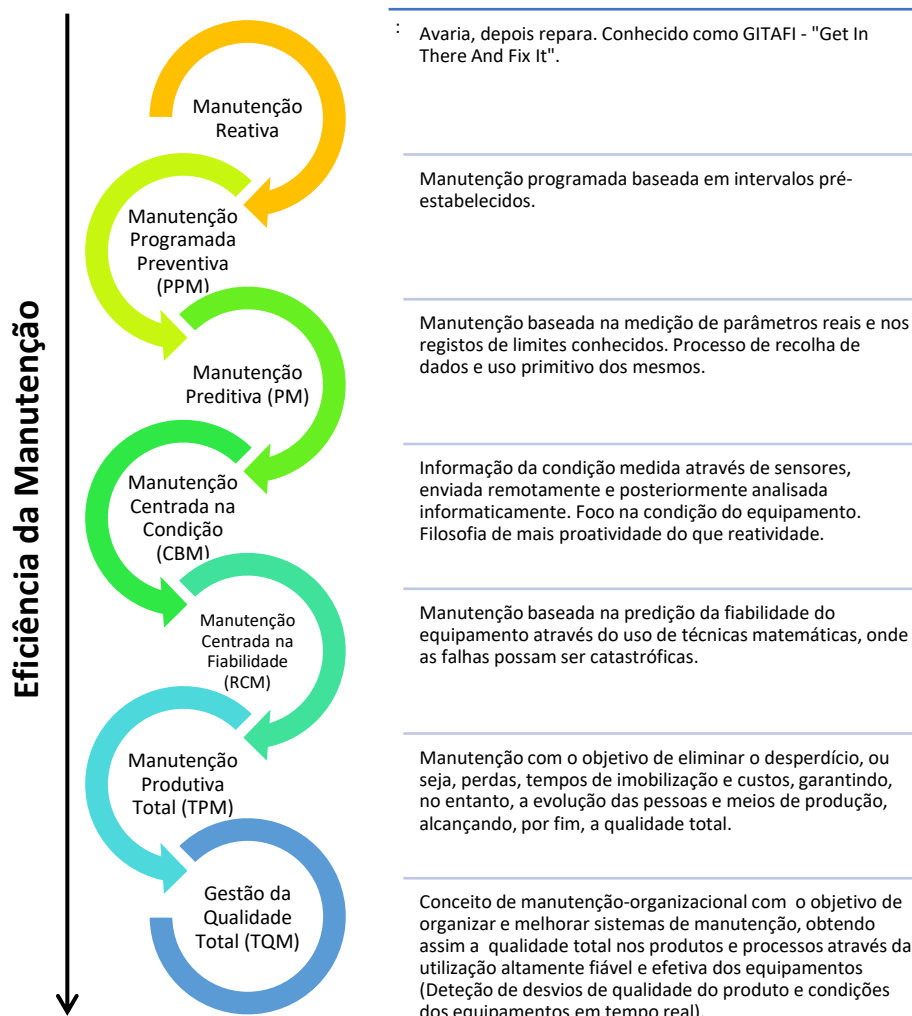


Figura 2. 2 - Evolução Histórica da Eficiência da Manutenção

Uma maior eficiência de manutenção está diretamente associada à capacidade da política de manutenção implementada fornecer e empregar dados relevantes que afetem o tempo de vida dos componentes/equipamentos em questão (ex: falhas), aumentando assim a eficácia de manutenção, em termos de mitigação de falhas e maior disponibilidade dos equipamentos/componentes (Al-Najjar e Alsayouf, 2003).

### 2.2.3. Estratégias de Manutenção

Uma vez delineados os objetivos de manutenção, uma estratégia terá de ser adotada de maneira a definir o tipo de manutenção a executar, quando deverá esta ser realizada e com que frequência deve ser feita (Muchiri *et al*, 2011).

De acordo com Pintelon e Van Puyvelde (2006), a estratégia de manutenção a ser adotada pode ser amplamente explicada com base nas ações de manutenção a serem realizadas e nas políticas de manutenção.

Niu *et al.* (2010), afirma que a manutenção é baseada em dois tipos: manutenção preventiva e manutenção corretiva. Sendo a primeira executada segundo intervalos predeterminados ou critérios preestabelecidos, com o intuito de reduzir a probabilidade de falha ou a degradação da função desempenhada de um bem. A segunda é realizada após a ocorrência de falha ou quando a falha é localizada. Estes tipos de manutenção, ilustrados na Figura 2.3, chamados de estratégias de manutenção, são subdivididos nas seguintes estratégias (Niu *et al.*, 2010; NP EN 13306, 2007; Kinnison, 2012; Muchiri e Smith, 2011):



Figura 2. 3 - Estratégias de Manutenção (NP EN 13306, 2007; Niu *et al.*, 2010)

### **Manutenção Preventiva**

A manutenção preventiva é o tipo de manutenção que é efetuada em tempos predeterminados (NP EN 13306, 2007), centrando-se na prevenção da ocorrência de futuras falhas nos equipamentos e no prolongamento do tempo útil de vida dos mesmos (Ahuja e Khamba, 2008; Misra, 2008). De facto, uma boa aplicação deste tipo de manutenção tem por objetivo minimizar os custos totais de manutenção e os tempos de imobilização ou restabelecer os níveis de fiabilidade e segurança a níveis aceitáveis (Misra, 2008).

A manutenção preventiva divide-se em dois tipos de manutenção diferentes, a sistemática e a condicional ou preditiva:

#### Manutenção Preventiva Sistemática

A manutenção preventiva sistemática é uma manutenção periódica que não pressupõe o controlo do estado de um bem e é realizada segundo intervalos predeterminados (NP EN 13306, 2007; Abreu *et al.*, 2015b). Na aeronáutica é chamado de *Hard Time Maintenance*, o potencial fixo de remoção para ação de manutenção, findo esta, o componente regenera potencial (condição de operacionalidade) até à seguinte remoção programada. Neste caso, o comportamento de degradação dos bens é conhecido. Estes intervalos de manutenção periódica são determinados ou a partir de intervalos predeterminados (ex: tempo de calendário, número de ciclos, horas de funcionamento) ou a partir do comportamento da falha do bem, em função do tempo de vida (potencial) do mesmo componente (Ghobbar e Friend, 2003).

#### Manutenção Preventiva Condicionada

A manutenção preventiva condicionada é subordinada à evidência de falha iminente ou que estado de degradação esteja próximo do nível de degradação predeterminado para manutenção, ou seja, manutenção baseada na condição (Ahuja e Khamba, 2008; Cabral, 2006). A manutenção preventiva condicionada é baseada em técnicas de controlo de condição entre elas podem-se destacar a análise de vibrações, inspeções visuais, termografias, ensaios não destrutivos (correntes induzidas, líquidos penetrantes, radiografia, ultrassons e emissão acústica) e análises de óleo, são alguns dos exemplos de manutenção condicionada. Estes métodos exploram o aviso prévio da falha, que poderá derivar de muitos fatores.

Na indústria aeronáutica, a esta tipologia de tarefas de manutenção concebidas para detetar falhas funcionais é dado o nome de tarefas *On Condition*. Esta tipologia de manutenção requer controlo de condição dos bens, em serviço, até um padrão limite de desempenho, com o propósito de avaliar os bens através de ensaios ou inspeções, sem ter que os remover do equipamento onde se encontra instalado. Os padrões limites de desempenho poderão variar, de acordo com ensaios de contexto de operação e com o programa de fiabilidade ou manual de manutenção do operador (Ghobbar e Friend, 2003).

No entanto, a aplicação destas duas estratégias de manutenção preventiva, a sistemática e a condicionada, deriva dos comportamentos de degradação de bens. Caso seja conhecido o comportamento de degradação do bem, a opção será a manutenção preventiva sistemática, caso seja desconhecido o comportamento de degradação do bem, é aplicada a manutenção preventiva condicionada (Deloux *et al.*, 2009).

### **Manutenção Corretiva**

O conceito de manutenção corretiva, na sua grande maioria, tem por missão, na eventualidade de ocorrência de falha, restaurar um sistema ou equipamento ao estado de operacionalidade. Na sua maioria, a manutenção corretiva envolve ações de reparação ou substituição de bens causadores de falha no sistema. Este tipo de manutenção tem como propósito o de melhorar a fiabilidade, manutibilidade e segurança dos equipamentos (Ahuja e Khamba, 2008; Misra, 2008).

A frequência de intervenção é imprevisível, pois, na maioria dos casos, o momento da ocorrência de falha é imprevisível (Misra, 2008). No entanto, ao apostar num historial de falhas possibilitará a execução de um plano de intervenção às mesmas para que se reduza a sua ocorrência (Ahuja e Khamba, 2008).

Poderá optar-se ainda por se efetuar imediatamente este tipo de manutenção, ou então, caso seja possível, efetuá-la noutra altura mais conveniente, ou seja, será executada assim que haja disponibilidade para tal e que não comprometa em demasia a disponibilidade do equipamento, designando-se como manutenção corretiva diferida, ou seja, “*manutenção que não é efetuada imediatamente depois da deteção de um estado de falha (...)*” (NP EN 13306, 2007).

De referir também que, na ausência de manutenção preventiva, da tipologia *Hard time* e *On condition*, a indústria aeronáutica utiliza a tipologia de manutenção, *Condition Monitoring*. Nesta tipologia de manutenção é necessário o controlo de condição dos bens, de variáveis relevantes (índice de falhas, indicadores de manutenção, índice de desgaste, etc), pois nem sempre é possível determinar o desgaste e o funcionamento adequado de cada um (Ghobbar e Friend, 2003; Kinnison, 2012).

## 2.3. Manutibilidade

A manutibilidade é um aspeto importante no ciclo de vida de um bem e é definida pela “aptidão de um bem, sob condições de utilização definidas, de ser mantido ou reposto num estado que possa cumprir uma função requerida depois de lhe ser aplicada manutenção em condições determinadas, utilizando procedimentos e meios prescritos” (NP EN 13306, 2007).

Manutibilidade pode, também, ser definida com o tempo máximo acumulado de imobilização (indisponibilidade),  $T_{ci}$ , este tempo resulta da soma dos períodos de tempo de manutenção preventiva e corretiva (Rau *et al.*, 2011):

$$T_{ci} = N_c \times M_c + N_p \times M_p \quad (2.3)$$

onde,

$N_c$ : número de ações corretivas de manutenção

$M_c$ : tempo médio das ações corretivas

$N_p$ : número de ações preventivas de manutenção

$M_p$ : tempo médio das ações preventivas

A manutibilidade é, no entanto, medida pelo tempo médio de reparação (MTTR), sendo este definido pelo tempo total de imobilização,  $T_{ci}$ , pelo número total de ações corretivas:

$$MTTR = \frac{T_{ci}}{N_c} \quad (2.4)$$

Misra (2008), define a manutibilidade como a probabilidade dum equipamento ou unidade ser restaurado ao estado de operacionalidade dentro de um tempo específico de imobilização para reparação (*downtime*). Os bens deverão ser desenhados de maneira a serem intervencionados sem grandes investimentos (recursos capitais, humanos e materiais) e no mínimo tempo possível. Este tempo de imobilização, como uma variável aleatória, tem uma distribuição de reparação:

$$M(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.5)$$

Onde,  $\lambda$  é a taxa de reparação e o  $t$  o tempo de reparação (downtime). Considerando  $MTTR = 1/\lambda$ , a manutibilidade pode ser expressa segundo:

$$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{MTTR}\right)} \quad (2.6)$$

Na Figura 2.4, é possível verificar-se a relação entre os valores médios de reparação (MTTR) e os valores de Manutibilidade:

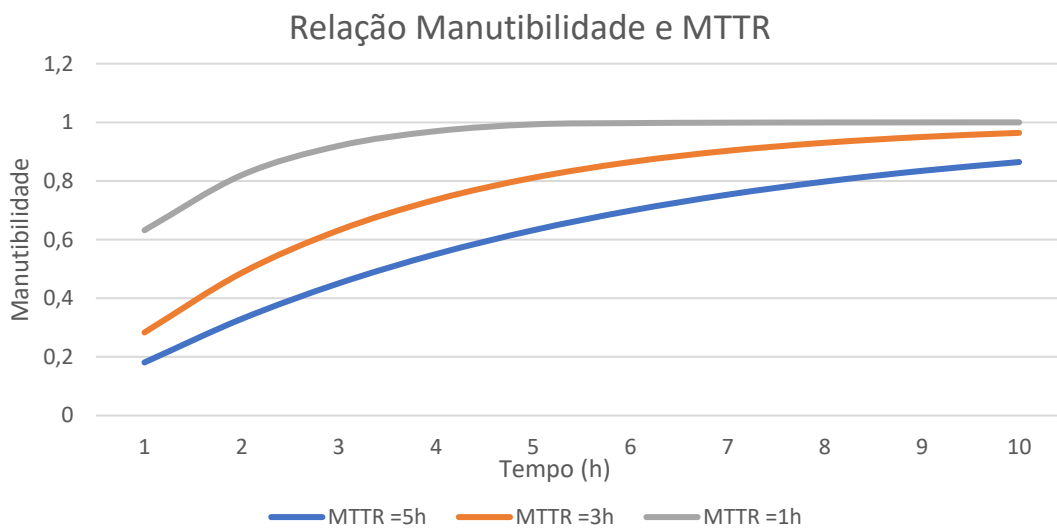


Figura 2. 4 - Relação entre valores de MTTR e Manutibilidade

Ao observar-se a Figura 2.4, é possível observar-se que para três valores distintos de MTTR, os maiores valores de MTTR correspondem a valores mais baixos de Manutibilidade e valores mais baixos de MTTR correspondem a valores mais altos de Manutibilidade. E segundo Rau *et al.* (2011), os maiores valores de Manutibilidade possibilitam o uso mais eficiente dos recursos, nomeadamente a redução do custo de manutenção, mas também possibilita o aumento de fiabilidade dos bens.

## 2.4.Fiabilidade

A fiabilidade de um bem define-se como a “*aptidão de um bem para cumprir uma função requerida sob determinadas condições, durante um dado intervalo de tempo. Poderá também ser definida como probabilidade*” (NP EN 13306, 2007).

A fiabilidade, segundo Bussel e Zaaier (2001); Pintelon e Van Puyvelde (2006); Kapur e Pecht (2014), é definida como sendo a probabilidade de um sistema desempenhar a sua função requerida, sem avarias, sob as condições de operação e no tempo de funcionamento desejado.

Contudo, para a dedução das expressões matemáticas, relativamente à fiabilidade de um bem, terá de se considerar um número total de componentes,  $N_o$ , durante um intervalo de tempo,  $t$ , em que uma parte desse número não sofre avarias ( $N_s$ ) e a outra parte desse número é afetada por avarias ( $N_f$ ). A fiabilidade ou probabilidade de sobrevivência,  $R(t)$ , e a probabilidade de falha ou de avaria,  $F(t)$ , são definidas segundo (Kapur e Pecht, 2014; Elsayed, 2012):

$$N_o = N_s(t) + N_o(t) \quad (2.7)$$

então,

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N_o} \quad (2.8)$$

$$F(t) = \frac{N_f(t)}{N_o} \quad (2.9)$$

onde,

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (2.10)$$

É lógico que, a fiabilidade não se mantém igual durante o seu tempo de vida nem a probabilidade de falhas, portanto, à medida que o tempo de operação aumenta a fiabilidade diminui e a probabilidade de falha aumenta, como se pode observar na Figura 2.5:

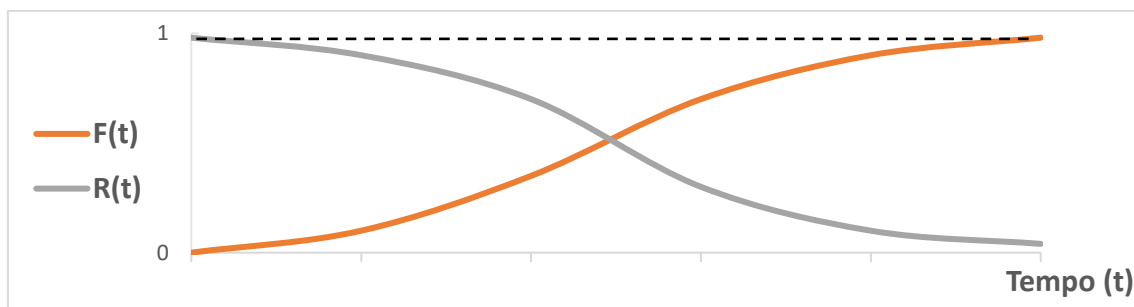


Figura 2. 5 - Exemplo de Fiabilidade e Probabilidade de Falha (Kapur e Pecht, 2014)

Derivando a probabilidade de falha,  $F(t)$ , em ordem ao tempo, é definida a função densidade de probabilidade de falha ou função de mortalidade,  $f(t)$ . Esta função

representa a percentagem de um determinado bem avariar num determinado tempo,  $dt$  (Figura 2.6):

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{1}{N_0} \frac{dN_F(t)}{dt} \quad (2.11)$$

Obtém-se, então, a função de probabilidade acumulada de falha,  $F(t)$ , entre o instante  $t = 0$  e  $t$ :

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (2.12)$$

A função de fiabilidade,  $R(t)$ , representativa da probabilidade de um bem continuar a desempenhar a sua função requerida, sem avarias, no instante entre  $t = 0$  e  $t$ :

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt \quad (2.13)$$

A função de risco ou taxa instantânea de avarias,  $h(t)$ , representa o número de bens que avariaram por unidade de tempo,  $t$  (Figura 2.6):

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.14)$$

por outras palavras,

$$h(t) = \frac{\text{n}^\circ \text{ componentes com avaria num intervalo de tempo}}{\text{n}^\circ \text{ componentes sem avaria no início do intervalo} \times \text{intervalo de tempo}} \quad (2.15)$$

No entanto, resolvendo esta equação em ordem  $R(t)$ , obtém-se a função geral de fiabilidade, expressando a probabilidade de não ocorrerem avarias:

$$R(t) = e^{-\int_0^t h(t)dt} \quad (2.16)$$

Uma das variáveis mais usuais na medição da fiabilidade é o tempo médio para falha (MTTF), dado por (Elsayed, 2012):



$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (2.17)$$

De referir que, esta variável só é utilizada em bens não reparáveis.

É importante, no entanto, não confundir com o tempo médio entre falhas (MTBF), pois este é só utilizado para bens reparáveis\* (rotáveis), dado por:

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (2.18)$$

\*Bens Reparáveis – Bens que, após a ocorrência de uma avaria, possam ser repostos em estado operável, prontos a desempenhar a sua função requerida (NP EN 13306, 2007).

Pode, então, concluir-se que para os bens não reparáveis, cuja falha inutilizará definitivamente o bem, o tempo médio de reparação é desprezável, então:

$$MTBF \approx MTTF \quad (2.19)$$

Para Tont *et al.* (2008), para maximizar a fiabilidade e a disponibilidade de um bem é necessário diminuir o impacto de falhas.

### 2.4.1. Curvas de Mortalidade

O tempo espectável de vida dos bens é determinado, frequentemente, a partir das funções acima definidas (taxa de instantânea de avarias, função fiabilidade, função probabilidade de falha e função de mortalidade).

O padrão seguinte, Figura 2.6, conhecido como a “Curva da Banheira”, é representada por três períodos: Mortalidade Infantil, Vida Útil e Degradação. Estes três períodos representam o comportamento do ciclo de vida de um bem.

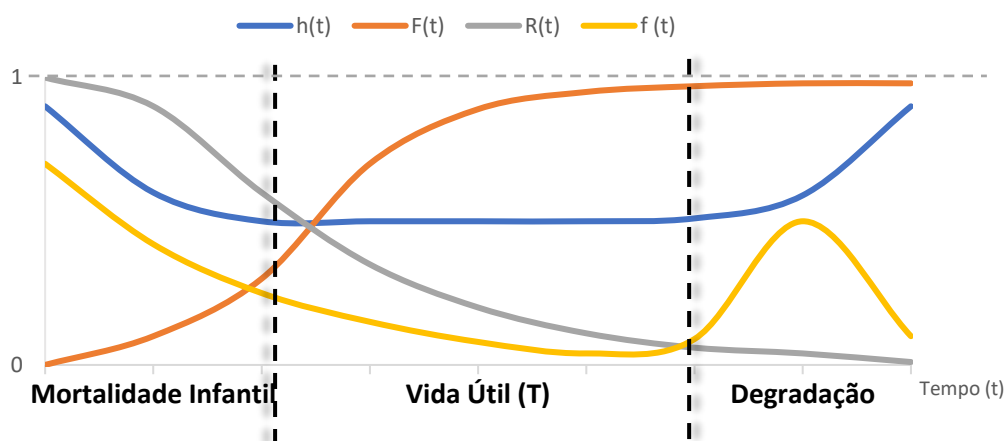


Figura 2. 6 - Diferentes períodos da Curva da Banheira

O período de **Mortalidade Infantil** é a fase inicial de vida de um bem e é caracterizada pela elevada taxa de avarias,  $\lambda(t)$ , que diminuirá progressivamente com o tempo, derivado aos defeitos de fabrico.

O período de maturidade, denominado de **Vida Útil (T)**, é caracterizado pela estabilização da taxa de avarias,  $\lambda(t)$ , e de baixo valor, podendo ocorrer avarias de carácter aleatório sem causa específica.

O período de **Degradação**, a zona de fim de vida útil, é caracterizado pelo crescimento acentuado da taxa de avarias, devido ao envelhecimento, fadiga e desgaste progressivo dos bens.

No entanto, a curva da banheira não é o único padrão representativo do comportamento do ciclo de vida de um bem, pois nem todos os bens apresentam o mesmo padrão de taxa de avarias. Em 1968, a United Airlines, elabora uma classificação da probabilidade de falhas nas suas aeronaves (Kinnison, 2012), esta classificação é constituída por seis padrões conhecidos de probabilidade de ocorrência de falha (A, B, C, D, E e F), tal e qual é ilustrado na Tabela 2.1:

Tabela 2. 1 - Os seis padrões de falhas (Adaptado de Moubray, 1997 e Kinnison, 2012)

	<p><b>A. Curva da Banheira</b>  Mortalidade Infantil – elevada taxa de avarias, tendência a diminuir com o tempo;  Vida Útil – taxa avarias constante;  Degradação – elevada taxa de avarias.</p>
	<p><b>B. Degradação</b>  Não exibe Mortalidade Infantil;  Taxa de avarias com tendência a aumentar até ao período de Degradação.</p>
	<p><b>C. Fadiga</b>  Não exibe Mortalidade Infantil;  Taxa de avarias com tendência a aumentar;  Sem período de Degradação definido.</p>
	<p><b>D. Falha Inicial</b>  Exibe uma diminuta taxa de avarias quando novo;  Aumento da taxa de avarias até se tornar constante durante o ciclo de vida do bem;  Sem período de Degradação definido.</p>
	<p><b>E. Componente Ideal (falhas aleatórias)</b>  Sem os períodos de Mortalidade Infantil e de Degradação definidos durante o ciclo de vida;  Taxa de avarias constante durante o ciclo de vida do bem.</p>
	<p><b>F. Mortalidade Infantil</b>  Exibe um período de mortalidade infantil com elevada taxa de avarias, com tendência a diminuir com o tempo;  Taxa de avarias constante durante o ciclo de vida do bem.</p>

Os padrões A, B e C correspondem a bens, cujas falhas são altamente influenciáveis pelo tempo de utilização, em que os modos de falha predominantes são a fadiga, a corrosão e a oxidação. Foi determinado que cerca de 11% das falhas, correspondem a estes três padrões iniciais de falha.

Os padrões D, E e F correspondem a bens cujo período inicial é onde se verifica a maioria das falhas e que a partir deste período inicial os modos de falha são aleatórios, em que os modos de falha são bastante variados, maioritariamente induzidos por manutenção ou defeitos de fabrico. Estes três últimos padrões, correspondem a 89% das falhas registadas.

Conclui-se, então, que a manutenção preventiva, revisões e substituições, tem êxito em cerca de 11% dos casos e que 89% dos casos, a manutenção centrada na condição, manutenção ou substituições segundo uma condição ou após a ocorrência de falha, é aquela que tem mais significado.

Apesar destes padrões de falhas, existe necessidade de uma melhor compreensão dos comportamentos das falhas dos bens.

A abordagem RCM, é uma metodologia efetiva na determinação da estratégia apropriada de manutenção baseada no comportamento das falhas dos bens, com o propósito de maximizar a fiabilidade ou minimizar os custos (Niu *et al.*, 2010; Abreu *et al.*, 2015b).

## 2.4.2. Métodos de Avaliação da Condição dos Ativos no Período de Degradação

De acordo com o objetivo da dissertação, de elaborar um modelo de suporte à decisão para a criação de valor, a uma frota de aeronaves, no seu período de degradação, é importante rever alguma da literatura existente sobre o tema da gestão dos ativos no período de degradação:

- Gorjian *et al.* (2017) fazem uso de modelos de degradação, baseados na fiabilidade dos ativos.

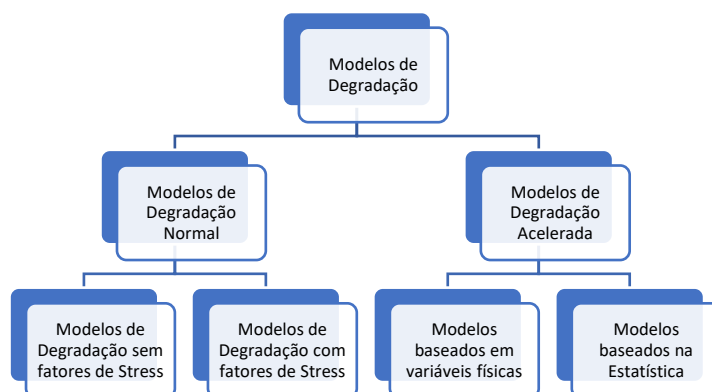


Figura 2. 7 – Modelos de Degradação baseados na Fiabilidade

Modelos de Degradação Normal: Modelos utilizados para estimar a fiabilidade, através do histórico de degradação dos ativos segundo condições normais de operação. No entanto, estes modelos são subdivididos em:

- ✓ Modelos de Degradação sem fatores de Stress: são aqueles cuja a medida de degradação não é uma função que defina o stress, sendo a fiabilidade estimada segundo níveis padrão (modelo geral do caminho de degradação, modelo do processo aleatório, modelos de regressão linear ou não linear, modelos integrados modelos temporais);
- ✓ Modelos de Degradação com fatores de Stress: são aqueles cujo stress é definido segundo a medida de degradação (modelo de interferência tensão-força, modelo de dano acumulativo, modelo do processo de difusão).

Modelos de Degradação Acelerada: Modelos utilizados para obtenção de fiabilidade, através do histórico de degradação dos ativos sob condições de stress ou de tempo acelerado, pois sob condições normais de operação o processo de degradação será muito lento e o tempo até à falha será bastante alto, são então submetidos os ativos ao teste de aceleração que permite acelerar certas variáveis (vibrações, temperatura, corrosão, cargas, voltagem e pressões). No entanto, estes modelos são subdivididos em:

- ✓ Modelos baseados em variáveis físicas: Compostos pelos Modelos de Arrhenius (quando os mecanismos de dano são causados pela temperatura), Modelo de Eyring (utilizados no teste de aceleração segundo as variáveis térmicas e não térmicas) e Modelo de Potência Inversa (utilizado para analisar os dados do teste de aceleração para equipamentos eletrônicos e mecânicos);
  - ✓ Modelos baseados na Estatística: modelos que avaliam variáveis estatísticas (modelo de tempo de falha acelerado).
- Mathew *et al.* (2012) propõem a utilização de um software que permita avaliar o tempo de vida remanescente de equipamentos eletrônicos, ou seja, que mantenha a aptidão para desempenhar a sua função requerida. Este software avaliará a fiabilidade dos equipamentos, segundo as tensões ou cargas (produção, montagem, testes, armazenamento, transporte e utilização) submetidas durante o seu ciclo de vida. O software tem como ferramentas a análise às tensões termais e mecânicas (vibrações), bem como os modelos de avaliação dano segundo o tipo de utilização do equipamento. O equipamento em estudo é o Integrated Electronic Assembly (IEA), utilizado na

Space Shuttle, que permite controlar o lançamento, a subida, a separação e a recuperação do foguete booster.

O cálculo do tempo de vida remanescente é de acordo com:

$$N_m = \frac{(D_f + D_{TD})}{D_m} \quad (2.20)$$

$N_m$  – número restante de missões

$D_f$  – Critério de falha

$D_{TD}$  – Critério de ciclos de dano durante o tempo de vida

$D_m$  – Critério de dano expectável por missão

Foi, então, estimado o tempo de vida remanescente do equipamento eletrônico segundo o histórico de cargas e danos submetidos e pelos danos expectáveis.

- Mazhar *et al.* (2007) referem que normas ambientais e legislativas, mas também pela competitividade dos mercados, as organizações são obrigadas a explorar as opções de utilização de componentes novos ou de componentes reparados, sendo esta opção, no entanto, limitada pelas técnicas utilizadas pelas organizações para avaliação de fiabilidade de componentes usados. O presente artigo propõe uma abordagem estruturada em duas etapas onde na primeira etapa o comportamento dos componentes para reutilização é analisado, estatisticamente, através da análise Weibull, ou seja, é analisado o histórico dos tempos até à falha para avaliar o tempo útil de vida dos componentes. A segunda etapa comporta a análise da degradação e monitorização da condição dos mesmos componentes através do desenvolvimento do modelo de uma rede neural artificial (*Artificial Neural Network - ANN*). Por fim, a análise Weibull e o modelo ANN são integrados de maneira a avaliar o tempo de vida remanescente dos componentes para reutilização.

A análise Weibull é utilizada para determinar o intervalo ideal de substituição/reparação de componentes, dada por:

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (2.21)$$

Analisado,  $F$  representa a fração de unidades a falhar e  $t$  o tempo até à falha. A distribuição é representada pelos parâmetros de escala  $\eta$  e pelo parâmetro de forma  $\beta$ .

O valor  $\beta$  identifica o modo de falha. Por exemplo:  $\beta < 1$  representa o período de mortalidade infantil,  $\beta = 1$  representa o período de vida útil e  $\beta > 1$  representa o período de degradação.

A estimativa da vida remanescente dos componentes é dada por:

$$L_R = L_M - L_A \quad (2.22)$$

$L_R$  – Vida Remanescente

$L_M$  – Vida Útil

$L_A$  – Vida Atual segundo as condições de utilização

Em suma, a abordagem proposta permite ajudar a gestão de topo na tomada de decisão operacional e estratégica durante as várias fases do ciclo de vida de um produto (projeto, utilização e degradação ou fim de vida).

- Mazhar *et al.* (2005) apresentam uma abordagem integrada que compreende duas fases que permite avaliar a fiabilidade dos componentes à reutilização no seu segundo ciclo de vida. Esta abordagem é constituída pela primeira fase onde é determinado o tempo útil de vida dos componentes através da análise do histórico dos tempos até à falha, baseado na análise Weibull. A segunda etapa baseia-se na monitorização da condição dos mesmos componentes, através da técnica de regressão linear múltipla. Por fim, a análise Weibull e a técnica de regressão linear múltipla são integradas de maneira a avaliar o tempo de vida remanescente dos componentes no fim de vida de um produto.

Devido à grande competitividade dos mercados, os fabricantes adotam várias filosofias e métodos para permitir a extensão do ciclo de vida dos produtos (Figura 2.8).

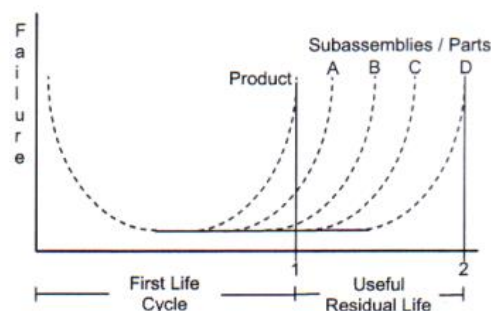


Figura 2. 8 – Curva da Banheira com extensão do ciclo de vida (retirado do artigo em questão)

Os autores consideram que ao evitar o desmantelamento ou alienação prematura dos componentes, poderá permitir economizar bastantes recursos.

Sendo que, o processo de decisão da reutilização terá de passar por várias variáveis, entre elas, a incerteza da qualidade do produto depois de usado, para isso a abordagem propõe avaliar a propensão de um produto ser reutilizado num segundo ciclo de vida através:

$$L_R = L_M - L_A \quad (2.22)$$

$L_R$  – *Vida Remanescente*

$L_M$  – *Vida Útil*

$L_A$  – *Vida Atual segundo as condições de utilização*

A análise Weibull, já referida no artigo anterior, é utilizada para determinar o intervalo ideal de substituição/reparação de componentes e para classificar falhas e os seus comportamentos.

Já a técnica de regressão linear múltipla é utilizada para estimar e prever futuras tendências de certas variáveis, analisando o registo histórico.

Em suma, a abordagem proposta permite obter uma estima fiável da vida remanescente dos componentes e permite também promover a reutilização de componentes num segundo ciclo de vida.

## **2.5. Manutenção Centrada na Fiabilidade (RCM)**

O RCM é um processo de decisão lógico que se foca na melhoria das políticas operacionais, de manutenção e financeiras, com o objetivo de gerir o risco dos modos de falha causadores de falhas funcionais nos bens, da maneira mais efetiva possível (Nowlan e Heap, 1978; Moubray, 1997; Niu *et al.*, 2010), pretendendo, ao mínimo custo possível, maximizar a fiabilidade e segurança dos bens, e a segurança dos colaboradores (Ahmadi *et al.*, 2010a; Smith e Hawkins, 2004; Selvik e Aven, 2011).

Selvik e Aven (2011) e Misra (2008) referem o facto da RCM ser um processo sistemático de preservação da função de um bem através da aplicação efetiva de manutenção preventiva. Segundo Carretero *et al.* (2003); Ahuja e Khamba (2008); Ahmadi *et al.*



(2010a), a RCM é uma estratégia de manutenção que é implementada com o intuito de melhorar o programa de manutenção de vários sistemas, podendo, então, ser definida como uma abordagem sistemática às funções dos sistemas, às falhas dessas funções, causas e efeitos das falhas. E, uma vez que as falhas são conhecidas, terá de se ter em conta as consequências que poderão advir, pois serão importantes no processo de decisão do programa de manutenção mais apropriado.

O RCM reconhece que a execução de qualquer tipo de manutenção terá o objetivo de evitar, ou pelo menos reduzir, as consequências das falhas, e não evitar as falhas (Nowlan e Heap, 1978; Moubray, 1997).

### **2.5.1. Origem do RCM**

Na década de 50, com o aumento da procura de viagens aéreas, nos Estados Unidos da América e na Europa, houve grande necessidade de aumento da capacidade das frotas das companhias aéreas, em número e tamanho das aeronaves. É nesta expansão da indústria aeronáutica que a metodologia RCM, na década de 60, tem as suas origens, sendo que na altura a prática da manutenção das companhias aéreas, requerida pela FAA, era caracterizada com programas de manutenção preventiva muito extensos. A metodologia de manutenção usada para a mitigação de falha era baseada em intervalos de tempo, ou seja, era necessário executar uma revisão geral ou substituição de rotáveis quando um equipamento ou bem atingisse uma certa idade, de modo a garantir os padrões segurança e de fiabilidade. Com o aparecimento das aeronaves de grande porte, revolucionando assim a indústria aeronáutica civil, o exemplo disso é o Boeing 747, três vezes maior que qualquer outra aeronave de passageiros existente na época, a FAA verificou que a aplicação desta prática de manutenção, de frequente revisão geral, pouco efeito tinha em assegurar níveis de fiabilidade satisfatórios, tendo como grande consequência a imobilização da aeronave para manutenção, grande parte do seu ciclo de vida.

Em 1968, uma nova metodologia de manutenção foi desenvolvida e aplicada, com sucesso, no Boeing 747, o *MSG-1: Maintenance Evaluation and Program Development*. Esta metodologia considerava a influência que a função de um equipamento exercia no sistema, e tinha como pilares a manutenção centrada na fiabilidade (Moubray, 1997).

Nesse mesmo ano de 1968, a United Airlines elabora uma classificação de falhas através de 6 padrões (A, B, C, D, E e F) para as suas aeronaves (Moubray, 1997).

Após a aplicação do MSG-1 no Boeing 747, surgem melhorias à metodologia, sendo publicado em 1970, o *MSG-2: Airline/Manufacturer Maintenance Program Planning Document*. Sendo esta prontamente utilizada, e com sucesso, no desenvolvimento dos programas de manutenção do Lockheed 1011 e o Douglas DC-10 (Nowlan e Heap, 1978).

Ambas as metodologias, MSG-1 e MSG-2, tinham o objetivo de maximizar a segurança e a fiabilidade, com os seus programas de manutenção, ao menor custo possível (Moubray, 1997 e Nowlan e Heap, 1978).

É então, na década de 70, desenvolvida a RCM por várias entidades, entre elas a FAA (Niu *et al.*, 2010). Sendo que, a Marinha dos Estados Unidos da América é a primeira entidade a aplicar a metodologia RCM em navios e, no final dessa mesma década, a RCM é consagrada de *Reliability Centered Maintenance*. Sendo que, nas décadas de 70 e 80, a metodologia RCM é massivamente aplicada como técnica de manutenção preventiva a todos os sistemas militares e a instalações industriais civis, nomeadamente centrais termonucleares e térmicas.

Em 1978, é publicado um relatório intitulado *Reliability Centered Maintenance*, da autoria de Nowlan e Heap, requisitado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América. Com este relatório, pretendia-se identificar os processos de manutenção programada usados pela aviação civil, processos estes (MSG-2) que tinham o objetivo de aumentar a fiabilidade das aeronaves através de um melhor conhecimento dos eventos causadores de falha, com um custo de manutenção controlado. Este relatório funcionou como base para a metodologia *MSG-3: Operator / Manufacturer Scheduled Maintenance Development*, que é promulgado em 1980 e revisto em 1988 e 1993. Esta metodologia é ainda usada nos dias de hoje para desenvolver e melhorar os programas de manutenção de todo o tipo de aeronaves civis.

O RCM II é introduzido por Moubray em 1991, primeira edição do livro. O RCM II é, na sua essência, um melhoramento da versão original do RCM, introduzido por Nowlan e Heap. Este melhoramento introduz na tomada de decisão de manutenção o impacto no meio ambiente, sendo que se tornou mais preciso o processo de seleção de tarefas de manutenção e intervalos de manutenção (Moubray, 1997).

## 2.5.2. Questões Essenciais RCM

Segundo Emovon *et al.* (2016); Ahmadi *et al.* (2010a); Moubray (1997), a RCM define-se, em contexto de operação, como um processo que determina os requisitos de manutenção dos bens/equipamentos, de maneira a que estes continuem a desempenhar a sua função requerida. A RCM aborda, no entanto, sete questões cuja resposta deverá ser satisfatória, utilizando como guia as normas IEC 60300-3-11, SAE-JA1011, SAE-JA1012 (Selvik e Aven, 2011), assegurando assim o sucesso da metodologia RCM (Emovon *et al.*, 2016; Niu *et al.*, 2010):

1. Quais as funções e padrões de desempenho do equipamento, no contexto de operação?
2. De que formas é um equipamento incapaz de cumprir as suas funções?
3. Quais as causas de cada falha funcional?
4. Quais os efeitos de cada falha funcional?
5. Qual é a importância de cada falha (criticidade e custos)?
6. O que poderá ser feito de modo a prever ou prevenir cada falha?
7. O que deverá ser feito caso não se identifique a tarefa ou procedimento preventivo adequado?

É importante, no entanto, referir certos conceitos:

**Função e desempenho padrão:** antes que seja aplicado qualquer procedimento de maneira a assegurar que o bem continue a desempenhar a sua função, deverá ser definida a sua função e se será capaz de a desempenhar;

**Falha funcional:** é definida como uma total incapacidade do bem/equipamento de desempenhar a sua função requerida, esta definição engloba as falhas parciais, onde o equipamento funciona, mas não desempenha a sua função a um nível padrão de performance;

**Modos de falha:** eventos que originam/causam cada falha funcional;

**Efeitos de falha:** descreve o que acontece quando cada modo de falha ocorre.

Grande parte das estratégias de manutenção, abordadas pelo RCM, consistem em ações de manutenção programadas executadas em intervalos predeterminados, baseadas na fiabilidade inerente dos bens, com o objetivo de evitar a deterioração dos níveis de segurança e fiabilidade dos bens. Este tipo de tarefas, preventivas, são executadas antes da falha ocorrer, dividindo-se pelas seguintes categorias de tarefas (Nowlan e Heap):

- Tarefas programadas de restauro – pressupõem o restauro ou revisão geral de bens, consoante o seu tempo limite potencial, e não segundo a sua condição;
- Tarefas programadas de substituição (“*discard*”) – pressupõem a substituição de bens no tempo limite de vida, ou antes, independentemente da condição dos mesmos;
- Tarefas programadas “*on condition*” – ação programada para detetar e controlar certas condições físicas dos bens que possam indicar que esteja prestes a ocorrer uma falha funcional;
- Tarefas programadas de pesquisa de avaria - são ações padronizadas com o intuito de determinar a existência de falha ocultas, falhas essas, que não são evidentes ao operador.

O grande valor do RCM jaz sobre o seu reconhecimento de que as consequências das falhas são de carácter mais importante do que propriamente as suas características, pois um dos grandes focos do RCM é o de minimizar as consequências das falhas com manutenção proativa, e não de as evitar, por assim dizer. Segundo Nolan e Heap (1978); Carretero *et al.* (2003); Misra (2008), existem quatro consequências de falha:

- Consequências de falhas ocultas – falhas que não têm impacto direto, mas poderão originar múltiplas falhas com sérios riscos e, muitas vezes, com consequências catastróficas;
- Consequências de carácter ambiental e de segurança – falhas que, em termos ambientais poderão violar alguma norma ambiental e em termos de segurança poderão ferir ou matar alguém;
- Consequências de carácter operacional – falhas que afetem a produção, qualidade de produto, satisfação do cliente ou custos de operação ou custos de reparação;
- Consequências de carácter não operacional – falhas que não afetam a segurança nem a produção, sendo só são associadas ao custo de reparação.

No entanto, por vezes não é possível identificar tarefas preventivas realmente eficazes na redução do risco de falha a níveis toleráveis, é então aplicada a política de manutenção não programada (*run to failure*) ou um desenvolvimento melhorado do bem em questão. Este tipo de políticas de manutenção não programada, pressupõem que as consequências das falhas são aceitáveis, desde que a segurança não seja afetada. Caso a segurança seja afetada, é necessário um novo desenvolvimento do bem.

Dito isto, as questões essenciais do RCM visam responder qual a estratégia de manutenção mais apropriada para restabelecer níveis padrões de segurança e fiabilidade dos bens, de modo a reduzir o risco de falha.

### **2.5.3. Objetivos RCM**

Segundo Carretero *et al.* (2003) e Rausand (1998) um dos principais objetivos da metodologia RCM é focar-se nas funções mais importantes dos sistemas, preocupando-se mais no desempenho da função requerida do sistema, permitindo assim, aumentar a segurança e fiabilidade dos mesmos. Outro propósito, é o de reduzir ou mitigar as consequências das falhas, senão mesmo, prevenir a ocorrência das falhas. E, por último, senão o objetivo principal, é a redução dos custos de manutenção através da remoção de tarefas desnecessárias ou ineficientes, que não acrescentam valor ao plano de manutenção.

Apesar do objetivo principal, de aplicação da RCM, ser a redução dos custos associados a falhas e a tempos de imobilização, é possível também identificar outros benefícios menos perceptíveis (Misra, 2008):

- Identificação de diferentes modos de falha, previamente desconhecidos;
- Identificação de áreas com potencial para melhoria;
- Melhorar a disponibilidade dos bens e os stocks de bancada;
- Assegurar a formação dos colaboradores.

A RCM, apesar da grande variedade de aplicabilidade, tem como abordagens metodológicas principais (Ahmadi *et al.*, 2010a):

- Identificação funcional *top-down* ao nível do sistema até ao nível do componente, em vez de *bottom-up* ao nível do componente até ao nível do sistema;
- Controlo do risco de falha centrado nas consequências das falhas;
- Preservação funcional em vez da prevenção de falhas, assegurando a função do sistema e a sua disponibilidade;
- Manutenção com orientação para as tarefas em vez de orientação para os processos.

Sintetizando, a RCM consiste numa metodologia estruturada, que se baseia na análise de funções e das potenciais falhas dos equipamentos, com o objetivo de desenvolver um planeamento de manutenção estruturado, eficiente e rentável, que obtenha um nível de operação e de risco aceitável.

#### **2.5.4. Implementação do Modelo RCM**

A implementação inicial do RCM, geralmente, é sinónimo de custos elevados, no entanto, existem casos em que a sua implementação não é eficaz, por isso, Misra (2008) afirma que um passo essencial, antes de se iniciar a implementação do RCM, é um estudo que possa avaliar o custo-benefício da implementação RCM à organização. Porém, os benefícios nem sempre são fáceis de ser identificados, ao contrário de uma maior facilidade de identificação dos custos, por isso, existe uma metodologia de avaliação de benefícios composta por três passos. Primeiramente, será a identificação do problema. Seguidamente, estimativa de quais as melhorias resultantes da aplicação do RCM, em função do problema identificado. Por último, quantificação de cada melhoria, em termos de desempenho da organização (ex: disponibilidade de equipamentos, custos, lucros, etc.). Por fim, depois desta análise custo-benefício ser executada é necessário decidir se a implementação do RCM é justificada ou não.

Wilmeth e Usrey (2000) afirma que a implementação do RCM, contribuindo para a melhoria contínua do programa de manutenção, é tanto mais rápida quanto mais depender da experiência e conhecimento do operador, em termos de deteção de modos de falha e suas causas, pois depender de uma base de dados com o historial de falhas de cada equipamento, torna-se uma tarefa bastante dispendiosa em termos de tempo.

Após análise de vários autores, Fischer *et al.* (2012); Gabbar *et al.* (2003); Wilmeth e Usrey (2000), chega-se à seguinte metodologia de implementação da RCM:

- a) Escolha do objeto de estudo, cujo será aplicada a RCM;
- b) Definição dos limites de estudo;
- c) Definição de funções importantes do sistema, em que o objeto de estudo está inserido;
- d) Identificação dos modos de falha dominantes;
- e) Identificação dos modos de falha críticos;
- f) Identificação dos efeitos e causas de falha;
- g) Definição de tarefas de manutenção que mitiguem ou diminuam a probabilidade de cada modo de falha;
- h) Inspeccionar regularmente a implementação de RCM, acima descrita.

### **2.5.5. Benefícios da Implementação RCM**

A metodologia RCM, ao ser corretamente implementada, para além do foco principal da maximização da eficácia de manutenção, tem também os seguintes objetivos a serem alcançados (Moubray, 1997):

- Maior segurança e integridade ambiental;
- Redução da carga de manutenção;
- Melhor performance dos equipamentos;
- Maior rentabilidade de manutenção;
- Aumento do ciclo de vida útil dos bens/equipamentos;
- Elaboração do histórico de manutenção de fácil compreensão;
- Motivar os trabalhadores envolvidos na manutenção;
- Trabalho em equipa.

De acordo com Moubray (1997), para responder a grande parte das questões essenciais da RCM, é necessário desenvolver e aplicar uma FMEA, ou Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos para cada falha funcional. É dado assim um papel fundamental à FMEA no desenvolvimento de uma metodologia RCM, pois possibilitará a identificação de potenciais modos de falha e consequentes efeitos, no funcionamento de um dado sistema.

Segundo Mkandawire *et al.* (2011) e Misra (2008), a FMEA e FMECA são as ferramentas que são utilizadas pelo modelo RCM, onde a FMEA (qualitativa) identifica potenciais modos de falha e classifica a sua gravidade, enquanto a FMECA (quantitativa) hierarquiza os modos de falha de acordo com a probabilidade de falha e a gravidade de falha. Sendo que, a análise crítica (CA) não acrescenta nova informação à tradicional FMEA, apenas limita a abrangência aos modos de falha identificados (Lipo e Haq, 2011).

Emovon *et al.* (2016) afirma que a ferramenta normalmente utilizada é a FMEA na determinação dos componentes mais significante para a manutenção (MSI – Maintenance Significant Items).

## **2.6. Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA)**

A Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA), para Ahmed *et al.* (2007), é um método estruturado permite visualizar todas as relações causa-efeito entre os vários componentes de um sistema e, como resultado, permite identificar as falhas e/ou avarias num sistema, através do estudo dos seus modos de falha e seus efeitos nos vários componentes do sistema.

Segundo a EN 60812 (2006), define a FMEA como sendo um método de análise de risco indutivo que estabelece o efeito de falha ao longo dos sistemas ou processos e poderá ser executado com o complemento de análise de criticidade (FMECA). A FMEA é uma metodologia aplicada em equipa (Carbone e Tippett, 2004) que permite identificar e avaliar, a partir de cada modo de falha, as causas e respetivos efeitos, bem como avaliar os meios de prevenção e deteção dos modos de falha, por fim, permitirá determinar tarefas de mitigação de efeitos (Silva *et al.*, 2006; Stamatis, 2003).

Segundo a MIL-STD-1629A (1980), a FMEA é uma ferramenta de análise cujo objetivo é identificar todas as falhas potenciais existentes no sistema e os efeitos das mesmas, com base nos modos de falha. E por fim, classificar cada falha potencial segundo a severidade do efeito de falha. Para ter sucesso, a FMEA deverá ser iniciada na fase inicial de projeto, identificando e minimizando/mitigando as possíveis falhas ao menor custo possível (Johnson e Niezgoda, 2004).



### 2.6.1. Objetivos

Pillay e Wang (2003) referem que a FMEA tem um objetivo qualitativo e quantitativo. Qualitativo porque prevê a probabilidade de certos tipos de falha de sistema e quantitativo porque objetiva identificar os componentes cujas falhas poderão culminar em acidente, lesão e/ou na perda de propriedade. Então, o objetivo principal será de tornar os sistemas mais seguros ou mais fiáveis através das seguintes medidas (Pillay e Wang, 2003; Joshi e Joshi, 2014):

- Avaliação e análise do sistema de modo a determinar os efeitos de falhas de componentes, no desempenho e segurança do sistema;
- Identificação dos componentes críticos que afetam a segurança;
- Priorizar modos de falha;
- Desenvolvimento de um plano de ação focado em reduzir/prevenir os riscos, de modo a otimizar a segurança e/ou a fiabilidade do sistema.

De acordo com Moura (2000) a FMEA é uma técnica analítica de avaliação dos modos de falha potenciais e as suas causas. Esta avaliação deriva de uma análise de eventos baseados na experiência (eventos/falhas ocorridos no passado). Esta técnica analítica assenta no seguinte conjunto de objetivos:

- Identificar e avaliar os modos de falha, efeitos e causas de um processo;
- Identificar variáveis que poderão ser controladas para mitigar ou reduzir a ocorrência dos modos de falha;
- Classificação dos modos de falha, priorizando assim ações corretivas;
- Documentar resultados.

### 2.6.2. Origens

A FMEA tem a sua origem em 1949, com o desenvolvimento do procedimento MIL- P-1629, intitulado *Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*, procedimento desenvolvido pelas Forças Armadas dos Estados Unidos da América, e usado como técnica de avaliação fiabilística na determinação de efeitos de falha nos sistemas e equipamentos, classificando também estas falhas consoante o seu impacto no sucesso da missão e nas condições de segurança do pessoal e dos

equipamentos.

Na década de 60, este procedimento foi amplamente aplicado e desenvolvido pela agência aeroespacial norte americana, NASA, com o propósito de melhorar a fiabilidade dos sistemas e equipamentos do programa aeroespacial (Joshi e Joshi, 2014).

A meio da década de 70, o procedimento MIL-P-1629 é substituído pela norma MIL-STD-1629A (FMECA) e a *Ford Motor Company* inicia o seu uso generalizado. Com a utilização da FMEA, a Ford conquista uma maior credibilidade, fiabilidade e avanços nas áreas de projeto, de produção e de abastecimento.

Em 1987, a ISO (Organização Internacional de Normalização) desenvolve a ISO 9000, impulsionando as organizações a desenvolverem um Sistema de Gestão da Qualidade direcionado às necessidades, exigências e expectativas do cliente. É depois desenvolvida a norma de qualidade QS9000, pela Chrysler Corporation, Ford Motor Company e General Motors Corporation, norma aplicada à indústria automóvel que define o sistema da qualidade normalizado (standard) dos fornecedores (Silva *et al.*, 2006).

Em 1993, uma norma de FMEA para aplicação na indústria automóvel, é publicada pela AIAG.

Em 1994, a SAE desenvolve a norma SAE J-1739 (*Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design, Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes, and Potential Failure Mode and Effects Analysis for Machinery*), esta norma fornece os traços gerais de aplicação da FMEA na fase de projeto, fase de produção e em maquinaria.

### **2.6.3. Áreas de Aplicação**

A FMEA tem sido vastamente utilizada e desenvolvida, ao longo do tempo, como ferramenta de desenvolvimento de processos, produtos e serviços. Destacam-se, no entanto, áreas cuja aplicação atualmente tem ganho grande destaque, sendo estas as indústrias: Química, Aeroespacial, Militar, Automóvel, Eletrónica, Mecânica e de Semicondutores (Maheswaran e Loganathan, 2013). A sua aplicação abrange várias fases do ciclo de vida de um produto, nomeadamente na fase de projeto (conceção/desenvolvimento) otimizando as características do produto em estudo e

desenvolvimento, e na fase de processo (operação) com o foco na otimização dos processos e na redução de falhas (Haq e Lipol, 2011; Silva *et al.*, 2006).

Um dos exemplos de uso extensivo da FMEA é a indústria automóvel, pois a sua aplicação é um requisito muito importante por parte dos fornecedores desta indústria. No entanto, a FMEA é aplicada de um modo mais destacado, amplo e geral nas indústrias nuclear, aeroespacial, bioquímica (Haq e Lipol, 2011) e siderúrgica (Sakurada, 2001). Já este último autor, refere que a FMEA tem sido aplicada em sistemas hidráulicos e pneumáticos, equipamentos semicondutores e circuitos elétricos.

Em termos de aplicações práticas, a FMEA destaca-se pela positiva, que compreende (Reliasoft Corporation, 2015) a metodologia MSG-3 na indústria aeronáutica, avaliação de projetos e processos, análise Diagrama de Blocos de Fiabilidade (RDB), análise Markov, ISO/TS 16949, 6 Sigma, Process Safety Management Act (PSM) e FDA Good Manufacturing Practices (GMP's).

#### **2.6.4. Tipos de FMEA**

As aplicações da FMEA são variadas, consoante o tipo de aplicação, a FMEA terá diferentes classificações. A literatura existente, referente a este assunto, não é de todo consensual. Para Stamatis (2003), a FMEA é classificada como Sistema, Projeto, Processo, Serviço e Máquinas. Borgovini *et al.* (1993) classifica a FMEA como Projeto, Funcional/Processo e Serviço. Joshi e Joshi (2014) identifica a FMEA de Processo, de Sistema e de Projeto. Para Johnson e Niezgodá (2004) a FMEA é um procedimento qualitativo utilizado na fase de sistema, priori à fase de projeto. Para Moura (2000) é classificada em Projeto e Processo. A Figura 2.9, resume os tipos de FMEA consoante os autores acima referidos.

Em suma, as mais consensuais são a FMEA de Projeto e de Processo, pois a implementação da FMEA, com o desejado sucesso, depende do momento oportuno da sua aplicação. Segue-se a classificação de Stamatis (2003) e Moura (2000), teremos:

- FMEA de Projeto (DFMEA) – É um método de análise/identificação de potenciais, ou conhecidos, modos falha de produtos (componentes, máquinas, ferramentas) ou serviços antes que se inicie a produção, e encarrega-se de encontrar ações corretivas para esses modos de falha. A DFMEA tem como objetivo minimizar

os efeitos de falha no sistema. Ao realizar-se a FMEA nesta fase, a probabilidade de alterações/modificações ao projeto será menor, mas caso sejam implementadas alterações, sê-lo-ão com maior facilidade e com menores custos (Johnson e Niezgodá, 2004).

- FMEA de Processo (PFMEA) – É um método que tem como objetivo de maximizar a qualidade, a fiabilidade, a manutibilidade e a produção com a identificação e aplicação das melhores de soluções de engenharia, ao menor custo. A PFMEA será realizada de maneira a assegurar que os modos de falha potenciais dos produtos, suas causas e efeitos sejam avaliados, na extensão do possível, de modo a reduzir a ocorrência ou maximizar a deteção destes modos de falha e estabelecer prioridades na tomada de ações corretivas.

A PFMEA é um método de análise de processos de fabrico e montagem. Stamatis (2003), afirma que é muito difícil, senão impossível, aplicar o FMEA de Processo sem o FMEA de Projeto, logo partilharam dos mesmos objetivos.

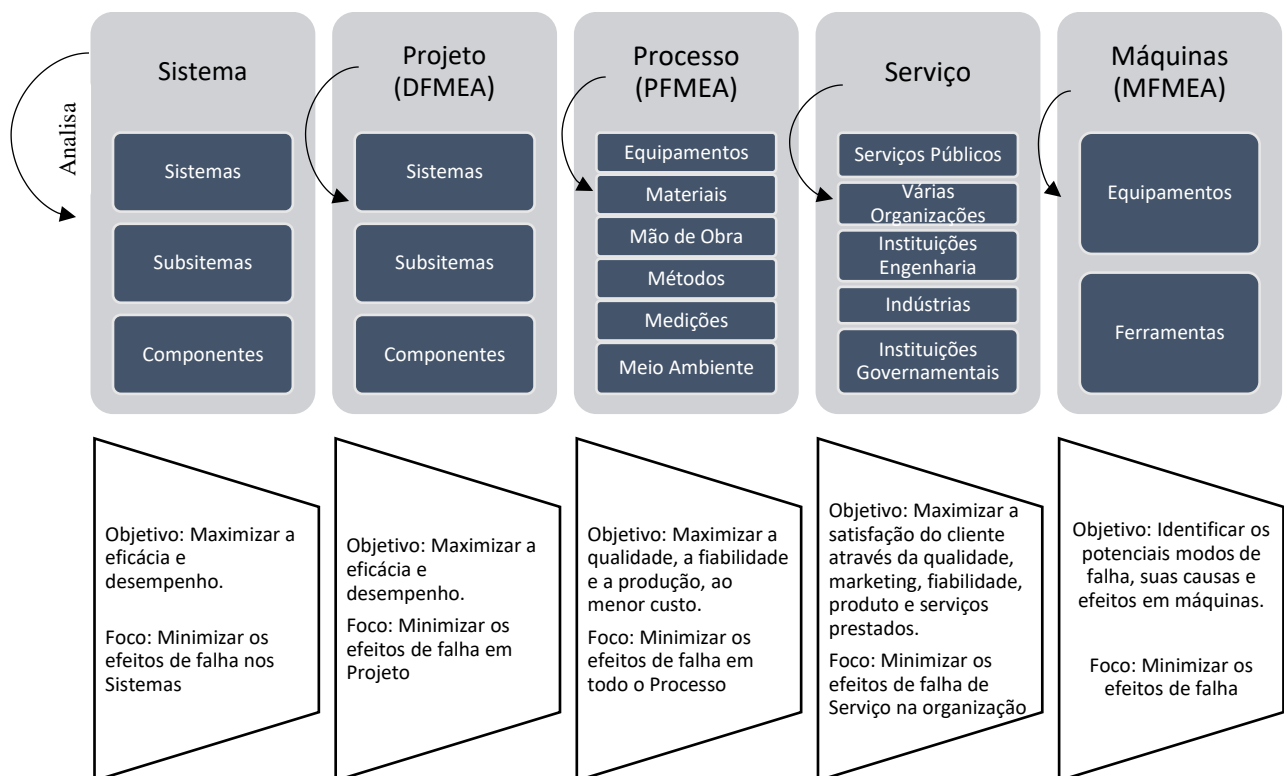


Figura 2. 9 - Tipos de FMEA (adaptado Stamatis, 2003)

De frisar que, de quaisquer alterações/modificações tardias poderão advir consequências desastrosas, tais como a probabilidade de introdução de novos modos de falha, pelo que será importante a atualização da FMEA nas seguintes situações (Mraz e Huber, 2005):

- Desenvolvimento de novos produtos ou processos;
- Alterações às condições de operação dos produtos ou processos;
- Alterações ao projeto do produto ou processo;
- Impostas novos requisitos e/ou normas;
- Reclamações do cliente, indicando problemas no produto ou processo.

Moura (2000) refere ainda que a FMEA ao ser corretamente aplicada, é um processo interativo que será sempre suscetível a alterações e atualizações.

## **2.6.5. Implementação da FMEA**

Após a análise da literatura existente relativamente à implementação da metodologia FMEA, de um modo geral verifica-se a existência de vários processos/procedimentos referentes a este assunto. Verificou-se também que a maior parte difere apenas no número de etapas, sendo que, todas as estas variações visam um objetivo comum, diminuir o risco (probabilidade) de falha através da redução do índice de ocorrência de falha e/ou aumentando a probabilidade de deteção de falha.

Moura (2000) descreve o procedimento de implementação FMEA em 22 passos. O autor descreve a implementação FMEA de Projeto (DFMEA) e Processo (PFMEA). Este procedimento composto por 22 etapas, terá como objetivo o preenchimento do formulário ilustrado na Tabela 2.5.

Por sua vez Tay e Lim (2006); Silva *et al.* (2006); Pillay e Wang (2003), referem que a implementação da metodologia de análise FMEA passa pelas seguintes etapas de desenvolvimento (Figura 2.10):

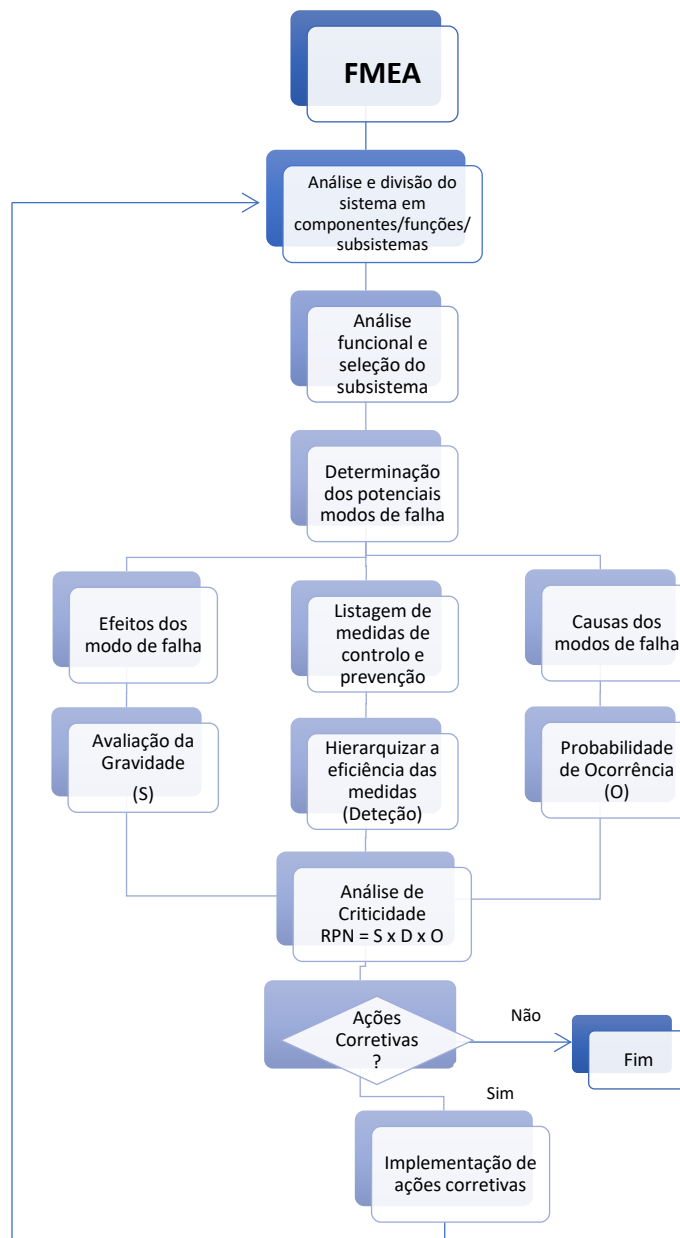


Figura 2. 10 - Fluxograma Implementação FMEA (adaptado de Tay e Lim, 2006; Pillay e Wang, 2003)

### I. Análise do Sistema e Respetiva Hierarquização.

Para formulação da FMEA, segundo Johnson e Niezgoda (2004), é um requisito proceder-se à identificação e ilustração hierárquica dos diversos componentes/subsistemas do sistema. É também bastante importante fazer uma representação simples do sistema através de diagramas, de maneira a realçarem as funções essenciais do sistema (Silva *et al.*, 2006).

Nesta primeira etapa é definido o sistema a ser analisado, delimitando-o. Os critérios de análise do sistema delimitado são bastantes importantes, pois poderá ser dividido por

exemplo por funções, em subsistemas ou em componentes (Silva *et al.*, 2006) de maneira a simplificar a análise.

## II. Estudo Funcional e Seleção do Subsistema a Analisar.

Nesta etapa elaborar-se-á uma listagem de componentes/funções/subsistemas em análise, tendo em conta os requisitos do cliente e do sistema. Deverão também definir-se patamares mínimos de desempenho do sistema nas fases de funcionamento inicial, utilização e manutenção. Contudo é importante definir também alguns dos intervalos de tempo requeridos relativos às fases de funcionamento do sistema como os intervalos de tempo para desempenho da função, procedimentos operacionais do sistema, controlo de condição, manutenção preventiva e/ou corretiva e para intervalos de tempo entre a ocorrência de um modo de falha e a implementação de medidas corretivas (Silva *et al.*, 2006).

## III. Identificação dos Potenciais Modos de Falha.

A cada função/componente/subsistema estará associado um potencial modo de falha. O potencial modo de falha poderá descrever-se pela forma como o componente/subsistema falharia no cumprimento da sua função requerida (Lipol e Haq, 2011). Nesta etapa realizar-se-á uma listagem dos potenciais modos de falha, associados aos componentes/funções/subsistema já conhecidos. Esta listagem tem como base típicos modos de falha documentados em casos de estudo, experiências laboratoriais, experiências práticas com casos reais e opiniões de especialistas. Como exemplos podem enumerar-se: fadiga, fissuras, deterioração da performance, deformação, desgaste prematuro, corrosão, fugas, vibração, queimado, etc. (Pillay e Wang, 2003).

Devido à constituição hierárquica de vários sistemas, os modos de falha potenciais podem sentir-se a vários níveis da cadeia hierárquica do sistema, podendo a FMEA analisar uma falha num nível inferior e descrever os efeitos num nível superior da cadeia hierárquica do sistema (Johnson e Niezgodá, 2004).

#### IV. Identificação dos Respetivos Efeitos.

Nesta etapa são listadas todas as consequências resultantes dos efeitos de cada potencial modo de falha, quer em termos de funcionamento/rendimento do componente/sistema, quer em normas regulamentares, quer no descontentamento que a não conformidade irá provocar no cliente final, quer em termos de segurança (Johnson e Niezgodá, 2004; Lipol e Haq, 2011).

#### V. Identificação das Respetivas Causas.

As causas de um modo de falha são as razões pelas quais o modo de falha ocorreu ou poderá ocorrer, ou seja, a sua origem (Lipol e Haq, 2011). Portanto, para cada modo de falha deverão ser identificadas e descritas as respetivas causas. Nesta fase é importante desenvolver e precisar as causas das falhas cujos efeitos de falha são mais graves, de maneira não serem desenvolvidos esforços desnecessários na identificação de causas que pouco efeito (influência) têm na fiabilidade do sistema (Silva *et al.*, 2006). A título de exemplo enumeram-se as causas mais típicas registadas: manutenção inapropriada, baixa qualidade de cordões de soldadura, corrosão, elevadas tensões de funcionamento, uso incorrecto de material, danos, formação de fissuras, mau uso de ferramentas, peso e centragem mal-executados, tratamentos térmicos inapropriados, etc. (Pillay e Wang, 2003).

#### VI. Determinação dos Métodos de Deteção e de Prevenção.

É importante nesta fase determinar a forma (método) como cada modo de falha é detetado e prevenido. Os métodos de deteção e prevenção podem variar entre ações de manutenção preventiva de controlo de condição (condicional), ou ações de sensibilização, ou adição de ações de manutenção a uma inspeção ou até mesmo realizada automaticamente por um equipamento (Silva *et al.*, 2006). Em todo caso, a determinação dos métodos de deteção e prevenção deve contribuir para a definição de ações de correção e mitigação ou diminuição da ocorrência dos modos de falha, respetivamente (Lipol e Haq, 2011).



## VII. Avaliação da Gravidade dos Modos de Falha – (S).

Nesta etapa será analisado e avaliado o impacto que cada efeito, resultante dos modos de falha, poderá causar no funcionamento do sistema, quer no impacto na operação seguinte, quer no produto final, quer também para o cliente. A classificação da gravidade dos efeitos terá em conta vários fatores como os efeitos no desempenho funcional do sistema, efeitos nos operadores e no meio envolvente, e no cumprimento dos requisitos exigidos pelo cliente e pelos regulamentos (Silva *et al.*, 2006). A sua avaliação será de acordo com a Tabela genérica (Tabela 2.2), em que o valor mais elevado da escala corresponderá a um efeito mais severo e o valor mais baixo a um efeito quase impercetível.

Tabela 2. 2 – FMEA: Critérios de avaliação da Severidade (Xu *et al.*, 2002; Chin *et al.*, 2009; Chang, 2009)

Efeito	Severidade do Efeito	Índice de Severidade
<b>Perigoso</b>	O modo de falha ocorre sem aviso prévio e com consequências perigosas. Suspende a operação do sistema.	10
<b>Sério</b>	O modo de falha ocorre com aviso prévio, com consequências perigosas para a segurança.	9
<b>Extremo</b>	Sistema/bem inoperável, sem comprometer a segurança. Perda da função primária.	8
<b>Severo</b>	Sistema/bem operável, mas o nível de desempenho afetado.	7
<b>Significante</b>	Sistema/bem operável. Nível de desempenho degradado.	6
<b>Moderado</b>	Desempenho moderadamente afetado. Necessária manutenção.	5
<b>Menor</b>	Desempenho pouco afetado. Efeito percetível. Não é necessária manutenção.	4
<b>Fraco</b>	Efeito pouco percetível e de pouca significância no desempenho.	3
<b>Muito Fraco</b>	Efeito localizado e insignificante no desempenho.	2
<b>Nenhum</b>	Sem efeito.	1

## VIII. Avaliar a Probabilidade de Ocorrência dos Modos de Falha - (O).

A ocorrência define a frequência ou probabilidade que uma determinada causa de um determinado modo de falha venha a suceder-se (Tay e Lim, 2006). A escala de valores (Índice de Ocorrência) geralmente utilizada compreende os valores do 1 ao 10, sendo que ao valor 1 corresponde uma baixa probabilidade de ocorrência de falha e o valor 10 corresponde a uma alta probabilidade de ocorrência de falha (Lipol e Haq, 2011), avaliação representada na Tabela 2.3. A probabilidade de ocorrência das causas dos modos de falha poderá ser calculada como uma estimativa a partir do histórico de avarias do subsistema em análise (Silva *et al.*, 2006) e da experiência com subsistemas similares.

Tabela 2. 3 - FMEA: Critérios de avaliação da Ocorrência (Xu *et al.*, 2002; Chin *et al.*, 2009; Chang, 2009)

Probabilidade de Ocorrência	Taxa de Ocorrência (Exemplo)	Índice de Ocorrência
<b>Extremamente Alta: Falhas Persistentes</b>	≥ 1 em 2	10
	1 em 3	9
<b>Alta: Falhas Frequentes</b>	1 em 8	8
	1 em 20	7
<b>Moderada: Falhas Ocasionalmente</b>	1 em 80	6
	1 em 400	5
	1 em 2000	4
<b>Baixa: Poucas Falhas</b>	1 em 15000	3
	1 em 150000	2
<b>Remota: Improbabilidade de Ocorrência de Falha</b>	≤ 1 em 1500000	1

#### IX. Avaliar a Probabilidade de Detecção dos Modos de Falha - (D).

A detecção é uma avaliação da probabilidade de detetar uma causa específica de um modo de falha (Tay e Lim, 2006), antes que chegue ao cliente (Silva *et al.*, 2006). Ao ter ocorrido a falha, será avaliada a eficácia dos processos/métodos de detecção e prevenção (Moura, 2000). A sua avaliação será de acordo com a Tabela 2.4, em que o valor mais baixo da escala corresponderá a uma elevada probabilidade de detecção e o valor mais alto à improbabilidade de detecção de uma causa específica de um modo de falha. Moura (2000) refere ainda que baixos índices de detecção não são sinónimo de baixos índices de ocorrência.

Tabela 2. 4 - FMEA: Critérios de avaliação da Detecção (Xu *et al.*, 2002; Chin *et al.*, 2009; Chang, 2009)

Probabilidade de Detecção	Probabilidade de Detecção por um Processo	Índice de Detecção
<b>Extremamente Improvável</b>	Não é possível detetar o modo de falha pelos processos de controlo existentes.	10
<b>Muito remota</b>	Probabilidade muito remota de detecção do modo de falha.	9
<b>Remota</b>	Probabilidade remota de detecção do modo de falha.	8
<b>Muito baixa</b>	Probabilidade muito baixa de detecção do modo de falha.	7
<b>Baixa</b>	Probabilidade baixa de detecção do modo de falha.	6
<b>Moderada</b>	Probabilidade moderada de detecção do modo de falha.	5
<b>Moderadamente alta</b>	Probabilidade moderadamente alta de detecção do modo de falha.	4
<b>Alta</b>	Probabilidade alta de detecção do modo de falha.	3
<b>Muito alta</b>	Probabilidade muito alta de detecção do modo de falha.	2
<b>Extremamente Provável</b>	O modo de falha será detetado.	1

#### X. Análise de criticidade (RPN).

A análise quantitativa da criticidade consiste no cálculo dos Números de Prioridade de

Risco (*RPN – Risk Priority Number*). O RPN quantifica o risco associado a cada subsistema/processo/componente de maneira a identificar os modos de falha mais críticos. Esta variável é calculada através do produto entre três fatores (Tay e Lim, 2006): Índice de Gravidade (S), Índice de Ocorrência (O) e Índice de Detecção (D).

$$RPN = S \times O \times D \quad (2.23)$$

XI. Priorizar ações corretivas.

Após o cálculo de todos os valores de RPN será feita uma hierarquização desses valores, priorizando os valores de RPN mais elevados de modo a serem alvo de ações de correção, minimizando/mitigando assim os potenciais modos de falha (Silva *et al.*, 2006), sendo a escala de prioridades definida no capítulo do estudo de caso.

Caso existam vários valores de RPN iguais, Tay e Lim (2006) alertam para o facto de o valor do risco poder ser diferente, ou seja, o peso dado aos três fatores que compõem o RPN poderá não ser igual. Pillay e Wang (2003) referenciam que a importância/peso que cada um destes três fatores dependerá da natureza do processo ou do produto, por outras palavras, dependerá da aplicação prática da FMEA (Pillay e Wang, 2003). Como tal, devido a este facto, Silva *et al.* (2006) referem como boa prática de caracterização do risco a consideração do índice de gravidade (S - Severidade) e o RPN de cada modo de falha, aumentando assim as probabilidades de uma melhor tomada de decisão.

XII. Implementação de ações corretivas.

A aplicação de ações corretivas visa a redução de risco dos modos de falha, através do novo cálculo de RPN, verifica-se assim se as medidas reduziram/mitigaram a probabilidade de falha através do aumento da deteção ou redução da gravidade da falha (Silva *et al.*, 2006) ou redução da sua ocorrência, não será executado pois o problema será analisado através de diferentes critérios.

### **2.6.6. Exemplo de Aplicação FMEA**

O exemplo seguinte, representado na Figura 2.11 e Tabela 2.5, relata o processo da tiragem de um café e, conseqüente, serviço ao cliente:

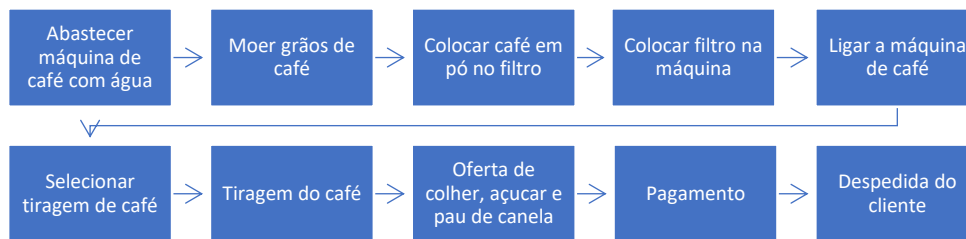


Figura 2. 11 - Sequência Tiragem de Café

Identificação do processo/sistema a analisar e representação simples das funções do processo/sistema;

- I. No campo Processo/Função, é inserido o primeiro passo na tiragem de um café;
- II. Identificação dos modos de como o processo poderá falhar, modos de falha;
- III. Identificação dos efeitos que os modos de falha poderão ter na satisfação final do cliente;
- IV. Identificar as causas dos modos de falha;
- V. Determinação de medidas de controlo que permitam prevenir e detetar os modos de falha;
- VI. Cotar numericamente a gravidade (Severidade) de cada efeito, através da Tabela de escala de severidade;
- VII. Cotar numericamente a probabilidade (ocorrência) que uma determinada causa de um determinado modo de falha venha a ocorrer, através da Tabela de ocorrência;
- VIII. Cotar numericamente a probabilidade de deteção de uma determinada causa de um determinado modo de falha;
- IX. Identificação da criticidade dos modos de falha, através do cálculo dos Números de Prioridade de Risco ( $S \times O \times D$ );
- X. Identificar os RPN's mais críticos a serem analisados, segundo as premissas:
  - a.  $RPN > 300$ ; tomar ação imediata de modo a obter  $RPN = 125$ ;
  - b.  $125 < RPN \leq 300$ ; tomar ação de modo a obter  $RPN = 125$ ;
  - c.  $RPN < 125$ ; tomar ação numa oportunidade mais favorável.

Selecionar ações que façam diminuir a ocorrência e aumentar a deteção dos modos de falhas mais críticos,
- XI. Cálculo dos novos Números de Prioridade de Risco.

Nota: Casos em que diferentes modos de falha tenham o mesmo valor de RPN, devem ser priorizados os modos de falha em que existam uma maior gravidade. E, em casos que o RPN de um determinado modo de falha seja menor que os restantes, no entanto o seu valor de gravidade é muito mais elevado que nos restantes modos de falha, esse modo de falha deverá ser priorizado.

Tabela 2. 5 - Exemplo aplicação FMEA

Sistema: Máquina de Café				Responsáveis pela Equipa de Trabalho		Área / Nome			Rubrica	FMEA Número: 01/2016							
Modelo: XPTO						Luís			X	X	X	X	Data FMEA: 01ABR16				
Empresa: Cafés Lda						Pedro			X	X	X	X	Data de Revisão: 01AGO16				
Página: __01__ de __01						José			X	X	X	X	Data de Conclusão: 01SET16				
Processo / Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potencial(is) de Falha	Gravidade	Causa(s) Potencial(is) de Falha	Ocorrência	Medidas de Controlo	Deteção	RPN	Ações Recomendadas	Responsável	Data de Previsão	Resultados das Ações					
												Ações Tomadas	Gravidade	Ocorrência	Deteção	RPN	
Abastecer a máquina de café com água	Quantidade errada de água	Café muito forte ou muito fraco	7	Marcas do nível da água desgastadas	4	Inspeção visual	6	168	Substituição do depósito de água	Luís	22ABR16	Substituição do depósito de água	7	3	5	105	
	Quantidades erradas de Café	Mudança de sabor do café	8	Pessoa sem formação	5	Formação	4	160	Medidas de café recomendadas	Pedro	22ABR16	Medidas de café recomendadas	8	2	3	48	
	Sujidade na máquina do café	Contaminação do café	9	Desleixo pessoal	9	Repreensão	8	648	Inspeção à máquina	José	22ABR16	Inspeção à máquina	9	3	2	54	

### 2.6.7. Vantagens FMEA

A FMEA trata-se de um método de análise que tem uma aplicação transversal nas diferentes fases de um produto ou sistema: design, projeto, produção e exploração (CNPGB, 2005).

Através da aplicação deste tipo de análise, advêm o principal benefício que será identificar e avaliar, de uma forma sistemática e metódica, os vários subsistemas em termos de funcionamento, modos de falha, causas e respetivos efeitos, desenvolvendo assim um sistema de hierarquização fundamentada nas prioridades de ações corretivas dos modos de falha. Permite também melhorar os meios de deteção, prevenção e mitigação dos respetivos efeitos de falha (Silva *et al.*, 2006; Stamatis, 2003; CNPGB, 2005).

Para Joshi e Joshi (2014), a FMEA tem como pontos fortes:

- Redução de ocorrência de falhas similares;
- Minimizar custos;
- Otimizar a qualidade do processo, fiabilidade e segurança;
- Aumento da satisfação do utilizador;
- Foco na prevenção;
- Registo da análise de risco em vista a futuros desenvolvimentos/modificações.

Lipol e Haq (2011) referem alguns benefícios na aplicação da FMEA:

- Contribui para a otimização do design dos produtos e processos: Maior fiabilidade, qualidade e segurança;
- Melhor satisfação do cliente:
  - Contribui para a otimização/minimização de custos;
  - Redução dos tempos gastos no desenvolvimento e redesign;
  - Redução dos custos de garantia;
  - Aumento de vendas;
  - Redução de desperdícios em tarefas que não agregam valor.
- Contribui para o desenvolvimento de planos de controlo, planos de manutenção otimizados e análises de fiabilidade.

Os custos-benefícios da FMEA estendem-se para a capacidade de identificação mais precoce dos modos de falha, pois é quando os custos de execução de ações corretivas, para os mitigar, são mais reduzidas.

### **2.6.8. Limitações FMEA**

A FMEA, apesar de ter demonstrado ser benéfica nas fases de design, projeto, produção e exploração dos sistemas, produtos e processos, tem também algumas limitações, e exemplo disso é o seu caráter exaustivo, talvez a principal limitação, pois a sua aplicação é bastante morosa e acarreta alguns custos (CNPGB, 2005).

No entanto, apesar de todas as versatilidades que a ferramenta FMEA possa apresentar, é preciso também ter em conta que os seus resultados poderão não ter a abrangência necessária para uma avaliação de precisão dos componentes e das funções que propiciam maiores riscos à operação dos sistemas. Os autores Kutlu e Ekmekçioğlu (2012); Liu *et al.* (2013); Maheswaran e Loganathan (2013); Emovon (2016); Joshi e Joshi (2014); Lipol e Haq (2011); Chang *et al.* (2010); Chin *et al.* (2009); Silva *et al.* (2006), resumem estas limitações:

- Os três fatores de risco (O, S, D) são dificilmente avaliados com precisão;
- A importância relativa entre os três fatores de risco não é tida em consideração;
- A fórmula de RPN é questionável e debatível:
  - Avaliação é imprecisa;
  - Obtém-se um valor baixo de RPN sempre que, na operação de multiplicação dos três fatores de risco, dois dos valores de risco são muito baixos e o terceiro de alta criticidade.
- A fórmula RPN é fortemente sensível a variações dos três fatores de risco;
- O valor de RPN não mede a efetividade das ações corretivas;
- A interdependência entre vários modos de falha e efeitos não é tida em conta;
- Incapacidade de utilizar informação imprecisa;
- O valor de RPN considera os três fatores de risco, principalmente, em termos de segurança, ignorando certos fatores como os aspetos económicos;

- Requer um conhecimento profundo do assunto em estudo, por isso, é necessária uma sessão de brainstorming em equipa;
- Existência de números duplicados de RPN, pois a combinação do produto entre os três fatores de risco origina 1000 valores, dos quais só 120 são únicos;
- A escala de RPN, de 1 a 1000, contém várias lacunas, onde existem valores que não podem ser originados pelo produto entre os três fatores de risco (média de valores de RPN é 166; unicamente 6% dos valores de RPN são acima dos 500; existência de 120 números de RPN únicos);
- A análise FMEA é mais eficaz *Bottom-Up* e falha na identificação de alguns modos de falha ao ser executado *Top-Down*.

Existe, no entanto, a vertente fuzzy da FMEA, esta lógica fuzzy viabiliza que a avaliação de risco, a hierarquização e a priorização sejam baseadas no conhecimento dos *experts*, permitindo assim colmatar algumas destas limitações da FMEA tradicional, entre elas: a duplicação dos números RPN segundo diferentes combinações (SxOxD); números duplicados de RPN poderão representar níveis de criticidade diferentes; a importância relativa dos três fatores não é considerada no cálculo do número de RPN. Comparando a FMEA tradicional com a fuzzy FMEA, esta última introduz a função fuzzy RPN que baseada numa série complexa de premissas (regras) de input e output, definidas através do conhecimento dos *experts*, permite uma maior fiabilidade à análise fuzzy, sendo os três fatores analisados os mesmos da FMEA tradicional (Tay e Lim, 2006; Abdelgawad e Fayek, 2010). No entanto, para o objetivo desta dissertação, a lógica fuzzy não será considerada pois não terá a abrangência necessária para realizar uma avaliação mais profunda, baseada em diferentes critérios, dos sistemas críticos relacionando-os com os objetivos de manutenção.

## **2.7. Papel do Planeamento de Manutenção**

O planeamento de manutenção é definido como um meio de implementação das estratégias de manutenção, objetivos (disponibilidade, custos, etc.) e responsabilidades, previamente determinado pela gestão da manutenção (Marquez e Gupta, 2006).

Segundo Takata *et al.* (2004), o planeamento de manutenção é constituído pelo planeamento estratégico de manutenção e o planeamento de tarefas de manutenção



(Figura 2.12). Ou seja, o planeamento estratégico baseia-se na seleção da estratégia de manutenção adequada para cada bem, e o planeamento de tarefas de manutenção consiste no processo de planeamento, capacidade de planeamento e programação da periodicidade das tarefas de manutenção.

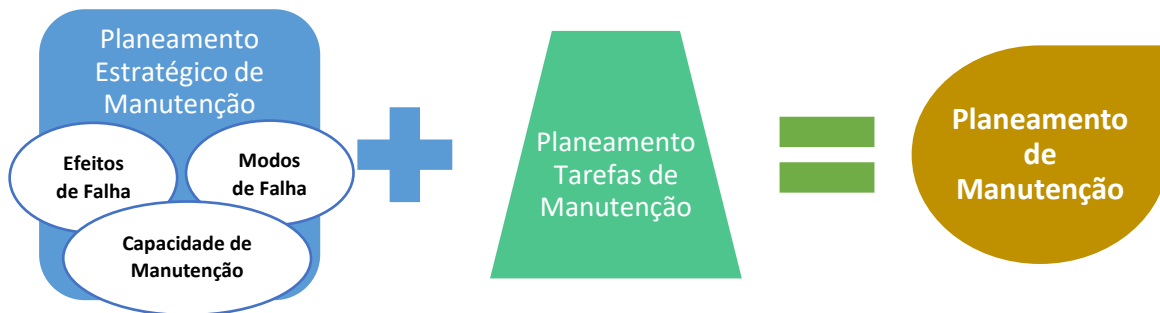


Figura 2. 12 - Constituição do Planeamento de Manutenção (adaptado de Takata *et al.*, 2004)

O planeamento de tarefas de manutenção, baseado no planeamento estratégico de manutenção, desempenha um papel essencial na gestão do ciclo de manutenção, pois a seleção de tarefas de manutenção é baseada na avaliação de ocorrência de potenciais falhas em regime de operação, seus efeitos e na capacidade de intervenção de manutenção. Este planeamento estratégico de manutenção serve também de elemento de ligação entre as fases de projeto e de operação, em termos de dados, determinando assim a estratégia de manutenção (tarefas e potenciais disponíveis).

Por fim, após a realização de todas as tarefas de manutenção definidas pela estratégia de manutenção, a condição atual dos sistemas/produtos é comparada com a condição esperada, de maneira que possa haver uma revisão (melhoria) no planeamento da estratégia de manutenção, tornando-o mais efetivo.

De acordo com Horenbeek e Pintelon (2014), para, efetivamente, se atingirem os objetivos de topo da estratégia de manutenção, estes terão de ser adaptados aos níveis mais baixos da estrutura organizacional. No entanto, o processo de manutenção só será efetivo se a sua estrutura estiver direcionada para três níveis organizacionais (Marquez e Gupta, 2006):

- Nível Estratégico – os objetivos da empresa tornar-se-ão nos objetivos da manutenção (através da análise dos componentes críticos, FMEA).

- Nível Tático – os recursos de manutenção (qualificações, equipamentos, materiais, etc) serão atribuídos corretamente para o cumprimento do plano de manutenção.
- Nível Operacional – garantir que as tarefas de manutenção são executadas por técnicos especializados, nos tempos corretos, com os corretos procedimentos e com as ferramentas adequadas.

Dito isto, a estrutura dos objetivos da manutenção define-se como uma abordagem “*top-down*”, traduzindo-se desde os objetivos de topo até aos objetivos nos níveis inferiores, Figura 2.13:

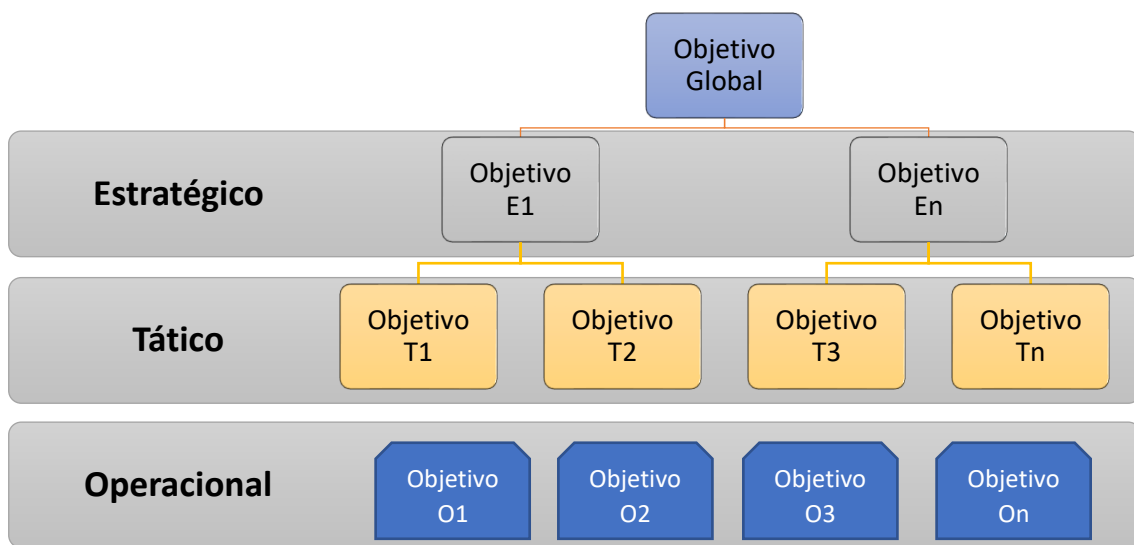


Figura 2. 13 - Níveis Organizacionais de Manutenção por Objetivos (adaptado de Horenbeek e Pintelon, 2014)

Segundo Horenbeek e Pintelon (2014), são de seguida sumarizados os objetivos organizacionais estratégicos de manutenção, em cada ponto, e depois subdivididos nos objetivos táticos organizacionais de manutenção:

- Orçamentos de Manutenção: Custos de Manutenção e Valor da Manutenção;
- Aspectos técnicos e funcionais: Fiabilidade, Disponibilidade, Eficácia dos Equipamentos (OEE), Manutabilidade, Produtividade, Qualidade de Manutenção e do Produto;
- Logística: Planeamento e Gestão de Materiais;
- Pessoas e Ambiente: Impacto Ambiental, Gestão de Pessoal e Segurança/Saúde/Risco.

Sendo que, os objetivos a nível operacional poderão ser subdivididos a partir dos objetivos estratégicos e táticos, acima definidos, exemplificando alguns como a adequabilidade das tarefas de manutenção, capacidade de manutenção, frequência de falhas, condições de operação, efetividade de manutenção, qualidade de manutenção e erros humanos. No entanto, os mesmos autores referem que os objetivos de manutenção deverão ser priorizados de acordo com a sua aplicação, ou seja, os critérios que mais influenciam a estratégia de manutenção e a operação, em cada nível organizacional.

Em suma, a eficiência do planeamento de manutenção será proporcional à adequação do planeamento estratégico de manutenção e não tanto ao planeamento de tarefas de manutenção (Takata *et al.*, 2004). No entanto, o planeamento de manutenção será também efetivo no cumprimento do objetivo global (topo) da estratégia de manutenção se orientado “*top-down*”, através da estrutura organizacional, de encontro aos objetivos organizacionais dos diferentes níveis (estratégicos, táticos e operacionais). Estes objetivos organizacionais de manutenção terão, no entanto, de ser adaptados e priorizados à sua realidade de aplicação, de acordo com a sua influência na estratégia de manutenção e em operação.

## **2.8.Nível Organizacional de Manutenção do Modelo Proposto**

Ao longo desta dissertação o conceito de manutenção abordado em termos práticos: o seu significado, tipologia, classificação, custos, benefícios e metodologias de planeamento da manutenção. De acordo, com o referido tanto na FMEA como nos objetivos organizacionais de manutenção, é possível relacionar estes dois pontos, como tal, apesar das limitações já descritas, existem certos parâmetros cuja a análise FMEA, a nível operacional, não tem em conta, pois numa organização de manutenção poderão ser decisivos para uma avaliação de precisão dos componentes e das funções que propiciam maiores riscos à operação dos sistemas. Por isso, para uma análise mais fiável do modelo proposto de manutenção desta dissertação, e consequentes resultados, a profundidade de análise terá de ser maior. Ou seja, os objetivos de manutenção terão de ascender a níveis organizacionais hierarquicamente superiores, para isso será necessário a aplicação de novas ferramentas que permitam a avaliação dos modos de falha e ações de manutenção, segundo diferentes critérios, ilustrado na Figura 2.14:



Figura 2. 14 - Tipologia de avaliação criterial nos diferentes níveis organizacionais

Contudo, Cabral (2006) afirma que o termo manutenção também se traduz pela tomada de decisão, em termos de investimentos necessários ou de revisão total ou de substituição (novo ou velho).

De maneira a colmatar grande parte das limitações apresentadas pela FMEA e melhorar ou maximizar a eficácia da sua análise de risco, Liu *et al.* (2013); Emovon (2016), Emovon *et al.* (2016); Maheswaran e Loganathan (2013), demonstram que uma aplicação híbrida da FMEA, ou seja, em junção com outro(s) método(s) de avaliação de risco é bastante benéfico, afirmando ainda que um dos métodos mais aplicados em junção com a FMEA são os métodos de análise de decisão multicritério.

Ahmed *et al.* (2007) enfatiza para o facto de que os métodos de análise de decisão multicritério serem técnicas de gestão e avaliação de risco, objetivando a priorização de eventos onde os riscos sejam maiores, neste caso de falha e de custos, e, à posteriori, executado um plano de mitigação dos mesmos.

### 3. Métodos de Tomada de Decisão

A decisão é algo inerente à vida de um ser racional. O ser humano, como ser racional, é dotado do poder de decisão pois enfrenta diariamente situações que o levam a tomar decisões.

Na maioria das vezes, o processo de tomada de decisão é baseado em critérios intuitivos como os pontos de vista, a intuição, as experiências ou o estado emocional. Em todo caso, a decisão ideal só existe se for baseada em um critério (Loken, 2007).

Todavia, quando um problema complexo requer uma decisão mais delicada, o processo de tomada de decisão considerará vários critérios, de modo a aproximar a decisão do ideal (Ishizaka e Nemery, 2013), em termos de desempenho, custos, fiabilidade, eficácia e eficiência, disponibilidade, segurança e redução do risco de falha.

Marins *et al.* (2009) define decisão com um processo de análise e de seleção de várias alternativas disponíveis.

Bhushan e Rai (2004) define o procedimento genérico para a tomada de decisão, baseado na tomada de decisão em múltiplos critérios, em vez de um único critério:

- Estudo do problema;
- Organização dos múltiplos critérios;
- Avaliação dos múltiplos critérios;
- Avaliação de alternativas com base nos critérios avaliados;
- Hierarquizar alternativas;
- Incorporar julgamentos de vários especialistas.

Loken (2007) afirma que os métodos existentes com capacidade de ajudar o decisor a tomar uma decisão originada num problema complexo, baseado em vários critérios, são chamados de Métodos de Apoio à Decisão Multicritério (MCDM).

## 3.1. Métodos de Apoio à Decisão Multicritério

### 3.1.1. Métodos Elementares

Segundo Linkov *et al.*, (2004) e Greening e Bernow, (2004), existem métodos elementares, métodos esses que têm o propósito de desmembrar problemas complexos em particularidades, de modo a facilitar a seleção da alternativa desejada. São eles compostos em:

- Método de Análise dos Prós e dos Contras – este é um método de comparação qualitativa, tendo o objetivo de identificar as qualidades e os defeitos de cada alternativa, e depois compará-los individualmente. A alternativa selecionada será aquela que apresentar a maior qualidade e o menor defeito. A análise SWOT é um exemplo deste tipo de método.
- Método de Maximização do Máximo e do Mínimo – neste método a estratégia é evitar o pior desempenho possível ou maximizar os critérios com menor desempenho. No primeiro caso, o critério com melhor desempenho será selecionado. No segundo caso, uma hierarquia dos piores atributos será criada, sendo selecionada a alternativa que apresente os piores atributos.
- Métodos Conjuntivos e Disjuntivos – estes métodos requerem um desempenho satisfatório, em vez do melhor desempenho possível. O método conjuntivo tem como princípio que, uma alternativa deve ter todos os seus atributos num nível de desempenho mínimo. O método disjuntivo tem como princípio que, uma alternativa deve ter pelo menos um atributo que exceda o nível de desempenho mínimo. Sendo que, depois será desenvolvida uma listagem de preferência, segundo os níveis de desempenho. As alternativas que não tenham os níveis de desempenho requeridos, vão sendo descartadas até que a alternativa restante será a selecionada.
- Método Lexicográfico – este método envolve um processo de eliminação sequencial até que a solução final seja encontrada. É desenvolvida uma listagem de preferência de atributos e escolhida a alternativa cujo atributo mais importante apresente melhor desempenho. Por fim, se este atributo tiver ligações com outra alternativa, o seu atributo mais importante que apresente melhor desempenho será

comparado, e o processo repetir-se-á até que uma única alternativa seja encontrada.

- Método de Atribuição de Valor – método de atribuição de uma avaliação aos elementos de várias alternativas, avaliação essa em termos da preferência por parte do decisor. Por fim, à alternativa com a maior avaliação é dada a preferência.

### **3.1.2. Métodos de Análise de Decisão Multicritério**

Existem os mais variados métodos de análise de decisão multicritério, diferem em muitas áreas como no suporte teórico, no processo de tomada de decisão e nos tipos de resultados atingidos. No entanto, todos os métodos têm um único propósito, o de criar um processo de tomada de decisão mais eficiente (Loken, 2007; Guitouni e Martel, 1998).

Os Métodos de Análise de Decisão Multicritério (MCDA) são métodos estruturados que conferem ao decisor as técnicas necessárias para encontrar a solução, a um problema complexo (Ishizaka e Nemery, 2013; Guitouni e Martel, 1998). Estes métodos para além de uma abordagem a problemas complexos, não solucionáveis por critérios intuitivos, conferem também, ao processo de tomada de decisão, uma transparência e clareza (Wang *et al.*, 2009; Marins *et al.*, 2009), de modo que os critérios fundamentais sejam compreendidos e identificados (Loken, 2007).

Nos dias de hoje, os MCDA têm vindo a ser aplicados nos sistemas económicos, industriais, ecológicos, agrícolas, biológicos e energéticos (Wang *et al.*, 2009).

Existem muitas classificações dos métodos MCDA, e a maior parte das classificações têm como base três modelos, ilustrado na Figura 3.1 (Linkov *et al.*, 2004; Kuznetsov *et al.*, 2015). Para autores como Loken (2007); Belton e Stewart (2002); Guitouni e Martel, (1998); Huang *et al.*, (2011) e Linkov *et al.*, (2004), os métodos MCDA são classificados em:

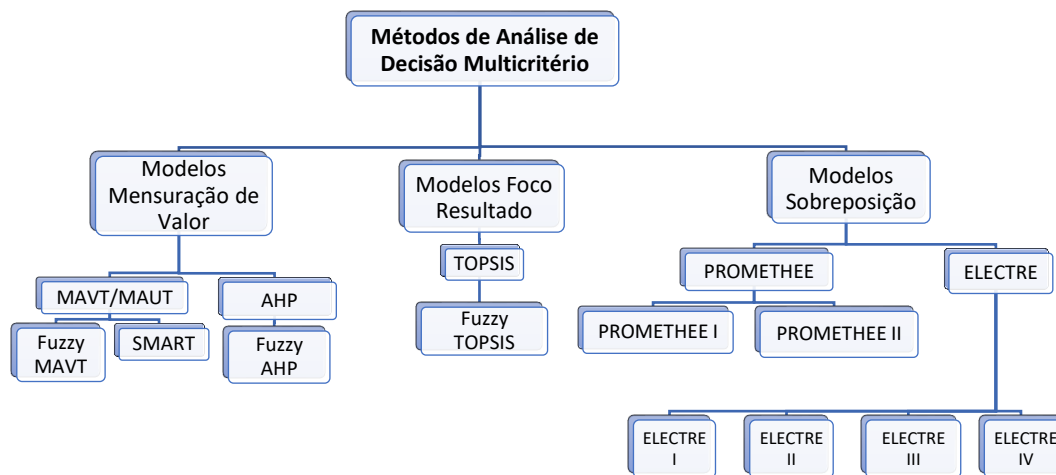


Figura 3. 1 - Os Métodos de Análise Multicritério mais utilizados (adaptado de Kuznetsov *et al.*, 2015)

### **Modelos de Mensuração de Valor**

Modelos cuja aplicação se baseia na atribuição de um valor numérico a cada critério (alternativa), segundo a sua importância. Por consequência, através destes valores, uma hierarquia de preferência será criada, com a maior preferência centrada nos valores mais elevados:

- **MAVT (*Multi-Attribute Value Theory*)** - Método de comparação quantitativa, usado pelos métodos de mensuração de valor, que tem por função a adição de valor numérico,  $V$ , a cada alternativa,  $a$ . Este método é de fácil compreensão e utilização, apenas terá de ser especificado o valor da função  $v$  (escala de 0 a 100) e definidos pesos aos critérios  $w$ , para que seja efetivo no processo de decisão (Loken, 2004; Kuznetsov *et al.*, 2015).
- **MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory*)** - Método com relação de proximidade do MAVT, mas baseado na função de utilidade e não na função de valor. Pode afirmar-se que o MAUT é uma extensão do MAVT, pois incorpora uma metodologia mais rigorosa na inclusão de preferência de risco e incertezas no processo de suporte de decisão multicritério. (Loken, 2007; Kuznetsov *et al.*, 2015).
- **AHP (*Analytic Hierarchy Process*)** - O processo analítico hierárquico, com semelhanças com a abordagem de função de valor multicritério (MAUT). O AHP é um método estruturado de organização e análise de problemas complexos,



decompondo-os numa hierarquia de decisão. O processo de aplicação do método AHP utiliza matrizes de comparações par a par, que permitem comparar diferentes alternativas segundo diferentes critérios e estimar o peso desses critérios. A partir destas matrizes é calculada uma hierarquia de alternativas, através de um processo matemático, com o objetivo de selecionar a alternativa que esteja no topo da hierarquia (Loken, 2007; Kuznetsov *et al.*, 2015).

### **Modelos com foco no Resultado**

Modelos cujo objetivo é encontrar uma opção que mais se aproxima do nível de resultados desejados:

- **TOPSIS** (*The Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution*) - Este método permite comparar as soluções alternativas com as soluções ideais e não ideais, através da atribuição de pesos a cada critério, sendo a melhor solução alternativa aquela que se encontrar geometricamente a uma menor distância da solução ideal e a uma maior distância da solução não ideal (Loken, 2007; Kuznetsov *et al.*, 2015).

### **Modelos de Sobreposição**

Modelos cujas alternativas são comparadas par a par, de modo a aferir a sua preferência, uma em relação à outra. Este modelo procura favorecer a alternativa que maior influência tem, em termos de desempenho, sobre o maior número possível de critérios:

- **PROMETHEE** (*Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations*) - Método baseado nos modelos de sobreposição, tem a função de determinar o índice de preferência de modo a determinar uma hierarquia de alternativas. Neste método é realizada uma comparação par a par de alternativas, que lhes permita obter a função de preferência para cada critério, tendo como objetivo fornecer os dados necessários ao índice de preferência (Loken, 2007).
- **ELECTRE** (*Elimination Et Choix Traduisant la Réalité*) - Método de sobreposição de tomada de decisão com o objetivo de comparar cada par de alternativas, baseando-se nas relações de sobreposição dessas alternativas (Kuznetsov *et al.*, 2015).

Segundo Huang *et al.* (2011), existem outros métodos MCDA que também são utilizados, como: DEMANTEL, NAIADE e DELPHI.

Os três modelos acima descritos, apesar de requererem diferentes tipos de informação (dados) e diferentes algoritmos de otimização, têm o único propósito de utilizar uma análise sistemática baseada em critérios múltiplos, com o objetivo de avaliar e selecionar as melhores alternativas disponíveis.

### 3.2. Justificação da escolha dos métodos AHP e TOPSIS

A escolha do método a utilizar depende em grande parte da decisão a tomar, ou seja, o melhor método é aquele que será capaz de fornecer o resultado final suposto, dando validade ao processo em estudo (Loken, 2007). Outro critério de escolha, também importante de realçar, é o da afinidade e familiaridade que o decisor terá com o método, neste caso o decisor irá escolher o método que melhor reflita os seus próprios valores (Loken, 2007; Guitouni e Martel, 1998). Em todo caso, o método escolhido deverá ser o mais apropriado a fornecer toda a informação necessária ao decisor, no entanto terá de ser o método consistente, funcional, de fácil uso e compreensão para que os resultados finais possam ser explicados e justificados (Hobbs e Horn, 1997).

Na Figura 3.2, é ilustrado a escolha e aplicação dos métodos de análise multicritério:

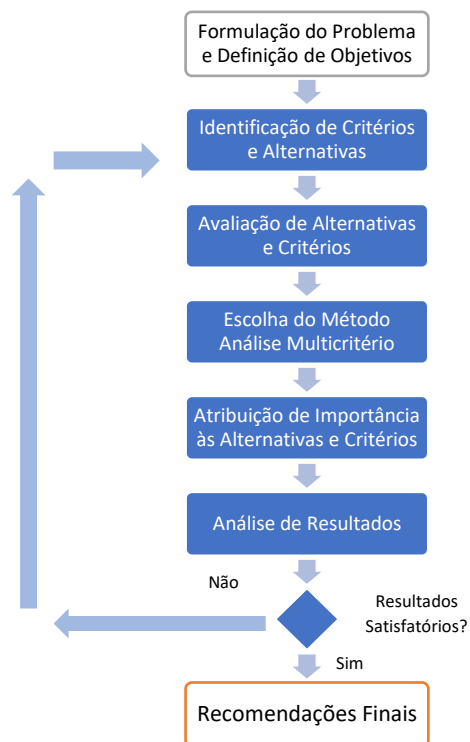


Figura 3. 2 - Diagrama de aplicação dos Métodos de Análise Multicritério (adaptado de Kuznetsov *et al.*, 2015)

Através da análise da Figura acima, é possível concluir que a escolha do método de análise multicritério se baseia na sua adequabilidade e capacidade de fornecer uma certa tipologia de soluções pretendidas ao problema em questão, de acordo com os objetivos definidos a alcançar, e sobretudo derivado ao tipo de critérios e alternativas a serem analisadas, sejam estes dados previamente mensuráveis ou incertos.

Sendo que, será necessário um complemento de decisão multicritério à análise FMEA e, na literatura consultada (Tabela 3.1), existem vários autores que sugerem os seguintes complementos à FMEA:

Tabela 3. 1- Ferramentas de análise multicritério complementadas à FMEA

<b>Ferramentas</b>	<b>Autores</b>	<b>Resumo</b>
TOPSIS	Sachdeva <i>et al.</i> (2009); Song <i>et al.</i> (2014); Bian <i>et al.</i> (2016)	- Hierarquização dos modos de falha através da incorporação de diversos tipos de informação; - Utilizado na decisão da estratégia de manutenção para cada modo de falha.
VIKOR	Emovon <i>et al.</i> (2015)	- Hierarquização do risco dos modos de falha utilizando dados imprecisos.
AHP	Shahrabi e Shojaei (2014)	- Permite o uso de dados qualitativos e quantitativos; - Limitação no uso de dados precisos.
AHP+PROMETHEE	Maheswaran e Loganathan (2013)	- Aplicação híbrida da FMEA com AHP e PROMETHEE, irá otimizar a hierarquização dos modos de falha identificados pela FMEA e a sua análise de risco.
Fuzzy FMEA + Fuzzy AHP	Ahmadi <i>et al.</i> (2016)	- Fuzzy FMEA utilizado para quantificar eventos de risco, baseado em julgamentos de experts, enquanto o Fuzzy AHP é utilizado para combinar e quantificar consequências, não abordadas pela FMEA (custo, tempo, qualidade); - Abordagem multicritério confere uma estrutura holística à gestão de risco;
Fuzzy FMEA + Fuzzy AHP + Fuzzy TOPSIS	Kutlu e Ekmekçioglu (2012)	- Lógica Fuzzy permite o tratamento de dados incertos e ao mesmo tempo uma avaliação de risco baseada na experiência dos experts; - Lógica Fuzzy é complexa, precisam de vários julgamentos e consome demasiado tempo; - AHP clássica é baseada nos julgamentos de experts; - A integração do Fuzzy AHP com Fuzzy TOPSIS resulta na hierarquização dos modos de falha até se chegar ao mais importante (crítico); - Modelo considera a importância dos fatores de risco.

Tendo em conta que a escolha da ferramenta mais apropriada deve basear-se nos critérios, alternativas e soluções pretendidas, Liu *et al.* (2013); Emovon (2016); Emovon *et al.* (2016); Maheswaran e Loganathan (2013), afirmaram que o AHP é o método de decisão multicritério mais popular na análise de risco através da quantificação subjetiva de fatores de risco e consequente hierarquização de modos de falha. Segundo Braglia (2000); Resobowo *et al.* (2014); Goossens e Basten (2015); Nystrom e Soderholm (2010);

Pariazaret *et al.* (2008); Arunraj e Maiti (2010), o AHP é a ferramenta a optar na seleção das estratégias (ações) de manutenção ideais.

Segundo as referências Ioannis e Nikitas (2013); Kalbar *et al.* (2012); Certa *et al.* (2013); Emovon (2016), afirmam que para uma maior eficiência e eficácia de avaliação e seleção da estratégia de manutenção, em termos de decisão multicritério, é necessária uma integração do AHP em conjunto com o TOPSIS, permitindo a hierarquização e seleção da melhor alternativa segundo os mais variados critérios, sejam eles imprecisos ou ambíguos.

Kumar e Agrawal (2009) e Certa *et al.* (2013) afirmam que o TOPSIS tem um papel preponderante de ajuda ao decisor a organizar um problema, sua consequente análise, comparação e hierarquização de alternativas. A ferramenta TOPSIS, ao ser uma ferramenta focada na solução ideal (Emovon, 2016; Sachdeva *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2013) cuja sua aplicação beneficia a escolha ideal de estratégia de manutenção.

O AHP é definido como uma ferramenta de atribuição de valores a determinados critérios, enquanto a ferramenta TOPSIS encarrega-se de selecionar a alternativa ideal ou mais próxima da ideal (Emovon, 2016; Certa *et al.*, 2013). Sendo que, Demirtas (2013) sugere a inclusão do TOPSIS com o AHP para colmatar as suas limitações e, poder assim, elevar os resultados a um nível económico, social ou ambiental.

Perante o acima referido, são escolhidas as ferramentas AHP e TOPSIS a serem implementadas no modelo proposto nesta dissertação.

Apesar destas duas ferramentas, o AHP, como método de mensuração de valor, e o TOPSIS, como método de foco no resultado, serem ambas são capazes de originar uma hierarquia de alternativas, o modelo proposto de planeamento de manutenção desta dissertação irá basear-se no pressuposto, acima descrito, do AHP ser a ferramenta que ponderará os critérios e o TOPSIS será o que irá selecionar a alternativa mais ideal, ou preferida. No entanto, a hierarquia de alternativas AHP será calculada, de modo a dar mais alguma validade e consistência à hierarquia de alternativas TOPSIS.

De ressaltar, no entanto, que na Tabela 3.2 são referidos alguns dos aspetos que caracterizam as ferramentas de apoio à tomada de decisão AHP e TOPSIS, bem como a sua aplicação na Indústria Aeronáutica:

Tabela 3. 2 - Quadro síntese de critérios de escolha AHP e TOPSIS

Evidências	Autores	Conteúdo
Versatilidade de aplicação em vários campos de estudo	Vaidya e Kumar (2006)	Referência a cerca de 154 outros artigos científicos, com o foco na grande aplicabilidade do AHP.
	Behzadian <i>et al.</i> (2012)	Referência a cerca de 266 outros artigos científicos, com o foco na grande aplicabilidade do TOPSIS.
Aplicação na Indústria Aeronáutica	Oeltjenbruns <i>et al.</i> (1995)	Desenvolvimento de diferentes alternativas de planeamento estratégico na Deutsche Aerospace Airbus, através da aplicação do AHP, visando a extensão de vida dos equipamentos/maquinaria existentes e a renovação total do sistema industrial, baseado em critérios económicos e tecnológicos.
	Ahmadi <i>et al.</i> (2009)	Uso da ferramenta AHP no desenvolvimento da estratégia de manutenção mais apropriada, que contribua para uma maior disponibilidade operacional das aeronaves, baseando-se na análise custo-benefício de manutenção.
	Ahmadi <i>et al.</i> (2010b)	Modelo que propõe o uso de várias ferramentas (AHP, TOPSIS, VIKOR) de tomada de decisão multicritério, de modo a eleger uma estratégia de manutenção que assegure a eficácia e consistência das decisões de manutenção.
	Demirtas (2013)	Aplicação do AHP na avaliação das competências dos centros de manutenção da aviação. Este estudo sugere a inclusão do TOPSIS para colmatar as limitações do AHP e, poder assim, elevar os resultados a um nível económico, social ou ambiental.
	Cokorilo <i>et al.</i> (2011)	Utilização do TOPSIS como ferramenta de escolha de aeronaves para certos voos, baseando-se em parâmetros tecnológicos ou operacionais.
	Berrittella <i>et al.</i> (2009)	Metodologia de aplicação do AHP, com o objetivo de comparar os custos operacionais, de certas companhias de aviação <i>low cost</i> e de bandeira.

### 3.3.Método AHP

O Processo Analítico Hierárquico (*AHP - Analytic Hierarchy Process*) é um método desenvolvido por Saaty, no início da década de 70 (Loken, 2007; Pohekar e Ramachandran, 2004). Este método de suporte à decisão foi concebido para analisar e selecionar a melhor alternativa, entre várias, respeitando vários critérios (Katayama *et al.*, 2005), através da otimização do processo de tomada de uma decisão.

Este método é uma técnica estruturada que visa organizar e analisar decisões complexas, baseando-se em comparações par a par, de acordo com a importância que cada critério tem em relação ao seguinte (Chu *et al.*, 2007), consistindo assim numa decomposição dos problemas complexos numa hierarquia de critérios, dotando de clareza e transparência os critérios em análise, de modo a obter uma maior simplicidade de análise a um problema complexo, em termos de quantificação e compreensão, otimizando assim o processo de

tomada de decisão, permitindo que haja uma tomada de decisão mais ponderada e simples (Chu *et al.*, 2007; Kuznetsov *et al.*, 2015; Marins *et al.*, 2009).

A metodologia AHP visa ser útil ao decisor, pois possibilita uma avaliação subjetiva (experiências, intuições, percepções), utilizando uma abordagem matemática que converterá os dados subjetivos em dados quantificáveis podendo assim serem avaliados e classificados (Bhushan e Rai, 2004).

### **3.3.1. Vantagens do AHP**

O AHP é uma metodologia com uma vasta variedade de aplicações e que apresenta um grande número de vantagens. Segundo Pohekar e Ramachandran (2004), uma das maiores vantagens do AHP é o cálculo do Índice de Consistência (CI). Este índice é importante ao decisor, pois irá assegurá-lo de que o seu julgamento será o mais consistente possível e que a decisão será tomada da maneira correta.

A metodologia AHP evidencia clareza, versatilidade e flexibilidade no apoio à decisão para as organizações (Marins *et al.*, 2009).

Steiguer *et al.* (2003) afirma que uma das vantagens do AHP é a sua capacidade de atribuição de valores numéricos a critérios subjetivos que constituem parte importante do processo de tomada de decisão.

Para Abreu *et al.* (2000), o método AHP demonstra ter uma boa capacidade de lidar com problemas que envolvam variáveis quantitativas e qualitativas.

Ahmadi *et al.* (2009) refere algumas das vantagens do AHP:

- Fácil compreensão e aplicável a inúmeros problemas não estruturados;
- Criação de uma estrutura hierárquica para os diferentes elementos de um sistema;
- Síntese de resultados, podendo assim estimar o nível de preferência de cada alternativa;
- Habilita o decisor de capacidade de escolha da melhor alternativa, de acordo com os objetivos.

### 3.3.2. Implementação da metodologia AHP

A metodologia de implementação do AHP, segundo Cay e Uyan (2013), para  $n$  critérios, é constituída pelas seguintes etapas:

#### I. Construção da Matriz das Comparações Par a Par

A estruturação hierárquica do problema visa decompor a complexidade do mesmo, de maneira a que haja uma melhor percepção, compreensão e avaliação do problema em questão. Por isso, ao implementar a metodologia AHP, o problema é decomposto numa hierarquia constituída pelo objetivo final, o elemento de topo da hierarquia, os vários elementos/critérios ou subcritérios, dependendo da complexidade do problema, e as alternativas de decisão nos níveis mais baixos da hierarquia (Pohekar e Ramachandran, 2004). Após a constituição da hierarquia, os vários elementos serão sistematicamente comparados par a par (*pairwise comparison*), aferindo o seu impacto/preferência nos elementos do nível seguinte (superior) da cadeia hierárquica (Katayama *et al.*, 2005).

#### a) Comparações par a par

De maneira a exprimir esta avaliação de intensidade de preferência/importância entre dois elementos, numericamente, Saaty, em 1990, desenvolveu a escala dos nove valores, representado na Tabela 3.3:

Tabela 3. 3 - Escala Numérica de Saaty (Cay e Uyan, 2013; Pohekar e Ramachandran, 2004; Loken, 2007)

Escala	Preferência
1	Igualdade entre $i$ e $j$
3	Moderada de $i$ em relação a $j$
5	Forte de $i$ em relação a $j$
7	Muito forte de $i$ em relação a $j$
9	Extrema de $i$ em relação a $j$
2, 4, 6, 8	Valores intermédios

Esta escala existe com o propósito de atribuir valores numéricos a elementos quantificáveis e não quantificáveis, de modo a que ambos os elementos possam ser comparados e relacionados de uma forma consistente (Kuznetsov *et al.*, 2015; Katayama

*et al.*, 2005). O  $n$  é o número de elementos diagonais pertencentes à matriz cujo valor é igual a 1 (Vaidya e Kumar, 2006), ou simplesmente é dado pela ordem da matriz.

Aqui os elementos são, numericamente, comparados e representados em forma matricial  $A$  ( $n \times n$ ) (Cay e Uyan, 2013; Katayama *et al.*, 2005):

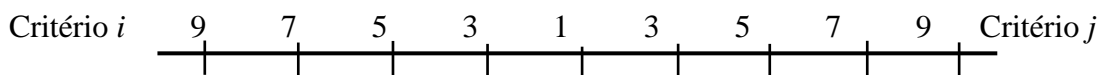
$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

Onde:

- $a_{ij}$  representa a importância do Critério  $i$  em relação ao Critério  $j$
- $a_{ii} = 1$
- $a_{ij} = 1/a_{ji}$  (3.1)

Os valores introduzidos na matriz  $A$  refletem a importância relativa de cada alternativa em relação ao objetivo final. Cada valor, na matriz  $A$ , resulta da comparação par a par do Critério  $i$  (linha) com o Critério  $j$  (coluna), resultando o valor  $a_{ij}$  de comparação da importância entre os dois critérios (Katayama *et al.*, 2005; Pohekar e Ramachandran, 2004).

Os elementos deverão ser comparados da maneira seguinte ilustrada:



Estes valores, deverão seguir as seguintes regras:

- Se o julgamento numérico entre o critério  $i$  e  $j$  for do lado esquerdo do valor 1, o valor na matriz de  $a_{ij}$  será o valor selecionado;
- Se o julgamento numérico entre o critério  $i$  e  $j$  for do lado direito do valor 1, o valor na matriz de  $a_{ij}$  será o valor  $a_{ij} = 1/a_{ij}$  ;

Este procedimento será efetuado para todos os critérios, em relação às alternativas propostas, criando uma matriz para cada critério.



## II. Normalização de Matrizes

Em cada matriz é calculado o somatório dos elementos de cada coluna, seguindo-se para o passo seguinte em que cada elemento será dividido pelo somatório da respetiva coluna, resultando a matriz normalizada,  $A_w$ :

$$A_w = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{12}}{\sum a_{i2}} & \dots & \frac{a_{1n}}{\sum a_{in}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{a_{n1}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{n2}}{\sum a_{i2}} & \dots & \frac{a_{nn}}{\sum a_{in}} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

## III. Cálculo do Vetor de Prioridade Principal ( $C_i$ )

O vetor de prioridade,  $C_i$ , calcula-se a partir das médias dos elementos de cada linha, da matriz normalizada,  $A_w$ , obtendo o vetor de prioridade,  $c_i$ , de cada linha:

$$C_i = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum a_{i1}} + \frac{a_{12}}{\sum a_{i2}} + \dots + \frac{a_{1n}}{\sum a_{in}} \\ \vdots \\ \frac{a_{n1}}{\sum a_{i1}} + \frac{a_{n2}}{\sum a_{i2}} + \dots + \frac{a_{nn}}{\sum a_{in}} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$c_i$ : demonstra o grau relativo de importância do critério  $i$

## IV. Controlo da Consistência dos Vetores de Prioridade ( $c_i$ )

O processo de identificação da consistência dos vetores de prioridade, é o seguinte:

### a) Cálculo do Vetor de Consistência ( $x_i$ )

O vetor de consistência,  $x_i$ , é determinado a partir da multiplicação da matriz de comparações par a par,  $A$ , com o vetor de prioridade principal,  $C_i$ :

$$x_i = A \times C_i = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

### b) Cálculo do autovalor ( $\lambda_{max}$ )

O cálculo do autovalor,  $\lambda_{max}$ , é efetuado através da média dos somatórios da divisão entre os vetores de consistência e de prioridade principal:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{c_i} \quad (3.5)$$

Este valor  $\lambda_{max}$  é a medida de consistência das comparações efetuadas.

c) Cálculo do Índice de Consistência (*CI*)

Segundo Pohekar e Ramachandran (2004), o Índice de Consistência (*CI*) é bastante importante, pois é uma ferramenta que dota o decisor de argumentos que tornam o seu julgamento e a sua decisão os mais consistentes possíveis. Este parâmetro é calculado de acordo com a seguinte fórmula:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3.6)$$

$n \rightarrow$  ordem da matriz

$\lambda_{max} \rightarrow$  máximo autovalor

d) Cálculo da Razão de Consistência (*CR*)

De maneira a assegurar a consistência da matriz de comparações par a par, em função da ordem da matriz ( $n$ ), é calculada a razão de consistência, *CR*:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3.7)$$

*CI*  $\rightarrow$  Índice de Consistência

*RI*  $\rightarrow$  Índice de Consistência Aleatória

O Índice de Consistência Aleatória (*RI*) é obtido na Tabela 3.4, proposta por Saaty, para várias ordens de matriz ( $n$ ).

Tabela 3. 4 - Valores do Índices de Consistência (Cay e Uyan, 2013)

<b>Ordem da Matriz (n)</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Valores de RI</b>	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

**A Razão de Consistência deverá ser menor que 10% ( $CR \leq 0,10$ )** para que o grau de consistência seja satisfatório, caso contrário, se for maior que 10%, o problema em questão, terá grandes inconsistências, sendo que, neste caso o método AHP não terá resultados significativos. Então, no caso de  $CR > 10\%$ , terá de ser refeita a matriz de comparações par a par, garantindo que a decisão final será tomada da maneira mais correta (Trevizano e Freitas, 2005; Pohekar e Ramachandran, 2004; Pamplona, 1999).

### 3.3.3. Exemplo de Aplicação AHP

De seguida é ilustrado a implementação do AHP, definido por Cay e Uyan (2013):

#### I. Construção da Matriz das Comparações Par a Par

O problema é decomposto numa hierarquia (Figura 3.3), de maneira a identificar as ligações entre cada critério e, correspondente, alternativa.

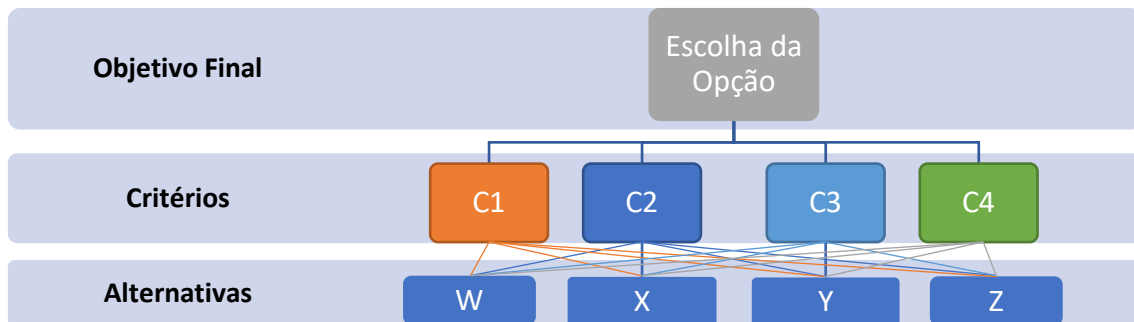


Figura 3. 3 - Exemplo de Estrutura Hierárquica Básica

#### a. Comparações par a par

Utilizando a escala de Saaty (Tabela 3.3) e as regras que de seguida se enumeram, os elementos são comparados, aferindo a sua preferência nos elementos do nível superior, e representados na forma matricial:

- Se o julgamento numérico entre o critério  $i$  e  $j$  for do lado esquerdo do valor 1, o valor na matriz de  $a_{ij}$  será o valor selecionado;
- Se o julgamento numérico entre o critério  $i$  e  $j$  for do lado direito do valor 1, o valor na matriz de  $a_{ij}$  será o valor  $a_{ij} = 1/a_{ij}$  ;

Tabela 3. 5 - Comparações Par a Par

<i>Critérios</i>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>
<b>C1</b>	1	4	5	1/2
<b>C2</b>	1/4	1	1/2	1/5
<b>C3</b>	1/5	2	1	1/5
<b>C4</b>	2	5	5	1

## II. Normalização de Matrizes

Calcular o somatório dos elementos de cada coluna das matrizes e de seguida cada elemento será dividido pelo somatório da respetiva coluna:

Tabela 3. 6 -Somatório de Colunas

<i>Critérios</i>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>
<b>C1</b>	1	4	5	1/2
<b>C2</b>	1/4	1	1/2	1/5
<b>C3</b>	1/5	2	1	1/5
<b>C4</b>	2	5	5	1
<b>SUM</b>	3,45	12	11,5	1,9

Tabela 3. 7 - Matriz Normalizada

<i>Critérios</i>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>
<b>C1</b>	0,290	0,333	0,435	0,263
<b>C2</b>	0,072	0,083	0,043	0,105
<b>C3</b>	0,058	0,167	0,087	0,105
<b>C4</b>	0,580	0,417	0,435	0,526
<b>SUM</b>	1	1	1	1

## III. Cálculo do Vetor de Prioridade Principal ( $C_i$ )

Aqui são calculadas as médias dos elementos que compõem as linhas das matrizes normalizadas, ou, o vetor de prioridade,  $C_i$ , de cada linha:

Tabela 3. 8 - Vetor de Prioridade Principal ( $C_i$ )

<i>Critérios</i>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>Média (<math>c_i</math>)</b>
<b>C1</b>	0,290	0,333	0,435	0,263	0,330
<b>C2</b>	0,072	0,083	0,043	0,105	0,076
<b>C3</b>	0,058	0,167	0,087	0,105	0,104
<b>C4</b>	0,580	0,417	0,435	0,526	0,489

De seguida, terá de se apresentar as comparações par a par de cada critério em relação às alternativas, seus vetores de prioridade principais, e por fim, o cálculo de um único vetor para cada alternativa, sendo que, este cálculo é traduzido pela multiplicação dos vetores principais de cada alternativa em relação a cada critério pelo vetor de prioridade principal ( $C_i$ ).

Tabela 3. 9 - Comparações C1

<i>C1</i>	<b>W</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Média (<math>c_i</math>)</b>
<b>W</b>	1	3	4	1/5	0,253
<b>X</b>	1/3	1	1/5	2	0,187
<b>Y</b>	1/4	5	1	1/3	0,195
<b>Z</b>	5	1/2	3	1	0,365
<b>SUM</b>	6,58	9,50	8,20	3,53	

Tabela 3. 10 - Comparações C2

<i>C2</i>	<b>W</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Média (<math>c_i</math>)</b>
<b>W</b>	1	1/9	1/3	5	0,181
<b>X</b>	9	1	2	1/2	0,389
<b>Y</b>	3	1/2	1	3	0,239
<b>Z</b>	1/5	2	1/3	1	0,191
<b>SUM</b>	13,20	3,61	3,67	9,50	

Tabela 3. 11 - Comparações C3

C3	W	X	Y	Z	Média ( $c_i$ )
W	1	3	2	2	0,389
X	1/3	1	1/5	3	0,302
Y	1/2	5	1	1/6	0,089
Z	1/2	1/3	6	1	0,220
SUM	2,33	4,53	14,00	6,17	

Tabela 3. 12 - Comparações C4

C4	W	X	Y	Z	Média ( $c_i$ )
W	1	3	1/5	1/8	0,199
X	1/3	1	5	5	0,391
Y	5	1/5	1	3	0,219
Z	8	1/5	1/3	1	0,191
SUM	14,33	4,40	6,53	9,13	

$$\begin{matrix} \mathbf{W} \\ \mathbf{X} \\ \mathbf{Y} \\ \mathbf{Z} \end{matrix} \begin{bmatrix} C1 & C2 & C3 & C4 \\ 0,253 & 0,181 & 0,389 & 0,199 \\ 0,187 & 0,389 & 0,302 & 0,391 \\ 0,195 & 0,239 & 0,089 & 0,219 \\ 0,365 & 0,191 & 0,220 & 0,191 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,330 \\ 0,076 \\ 0,104 \\ 0,489 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,235 \\ 0,314 \\ 0,199 \\ 0,252 \end{bmatrix}$$

Concluindo, então, que existe assim uma preferência de 23,5% sobre a alternativa W, 31,4% sobre a alternativa X, 19,9% sobre a alternativa Y e 25,2% sobre a Z.

#### IV. Controlo da Consistência dos Vetores de Prioridade ( $C_i$ )

##### a. Cálculo do Vetor de Consistência ( $x_i$ )

O vetor de consistência,  $x_i$ , é determinado a partir da multiplicação da matriz de comparações par a par,  $A$ , com o vetor de prioridade principal,  $C_i$ :

$$x_i = A \times C_i = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 5 & 1/2 \\ 1/4 & 1 & 1/2 & 1/5 \\ 1/5 & 2 & 1 & 1/5 \\ 2 & 5 & 5 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,330 \\ 0,076 \\ 0,104 \\ 0,489 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,401 \\ 0,309 \\ 0,420 \\ 2,052 \end{bmatrix}$$

##### b. Cálculo do autovalor ( $\lambda_{max}$ )

O cálculo do autovalor,  $\lambda_{max}$ , é efetuado, através da média dos somatórios da divisão entre os vetores de consistência e de prioridade principal:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{c_i} = \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{1,401}{0,330} + \frac{0,309}{0,076} + \frac{0,420}{0,104} + \frac{2,052}{0,489} \right) = 4,130$$

c. Cálculo do Índice de Consistência ( $CI$ )

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{4,126 - 4}{4 - 1} = 0,043$$

d. Cálculo da Razão de Consistência ( $CR$ )

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,043}{0,90} = 0,048 = 4,8\%$$

O Índice de Consistência Aleatória ( $RI$ ) é obtido na Tabela 3.4, ordem de matriz  $n = 4$ .

A Razão de Consistência é menor que 10% ( $CR \leq 0,10$ ), ou seja, o grau de consistência é satisfatório.

### 3.3.4. Limitações do AHP

A metodologia AHP, embora com várias aplicações e com resultados impressionantes (Ishizaka, 2011), poderá apresentar certos problemas como:

- O elevado número requerido de comparações par a par, aquando um elevado número de alternativas é considerado (Ishizaka, 2011);
- A interpretação e conseqüente conversão numérica, pela escala de Saaty, de elementos não quantificáveis poderá ser ambígua, pois pessoas diferentes têm interpretações diferentes (Ishizaka *et al.*, 2011);
- A escala linear de Saaty (1 a 9) oferece poucas possibilidades de seleção de alternativas. Em alternativa, Ishizaka *et al.* (2011) propõe outros tipos de escalas como a: logarítmica, raiz quadrada ou inversa;
- O índice de consistência não é de todo consistente, não garantindo a satisfação (Bana e Costa e Vansnick, 2008);
- Poderá ser um método bastante dispendioso, em termos de tempo, caso existam elevados números de níveis de hierarquia (Steiguer *et al.*, (2003).

Existe, no entanto, a lógica fuzzy que, aplicada ao AHP, pode colmatar a limitação da seleção e atribuição de valores concretos, baseados na escala de Saaty, a problemas da vida real onde existem níveis de incerteza e subjetividade (Shaw *et al.* 2012; Abdelgawad

e Fayek, 2010). Mas, para o objetivo do caso concreto da dissertação, tendo sido atribuídos valores a todos os elementos da cadeia hierárquica em relação ao objetivo global, irá ser necessário uma ferramenta que permita selecionar a alternativa mais próxima da ideal.

### **3.4.TOPSIS**

O TOPSIS é um método desenvolvido por Hwang e Yoon, em 1981 (Chiu e Hsieh, 2016), que se baseia na simples lógica de que a melhor solução é a que se encontra à menor distância geométrica da solução ideal (PIS) e, de preferência, à maior distância geométrica da solução não ideal (NIS) (Ahmadi *et al.*, 2010b; Chiu e Hsieh, 2016). Esta metodologia tem o objetivo de comparar um conjunto de soluções alternativas através da atribuição de valores numéricos de cada alternativa, sendo esta atribuição de valores determinada pela distância entre as alternativas dos dois pontos cardinais: PIS e NIS (Ahmadi *et al.*, 2010b; Chiu e Hsieh, 2016). A alternativa ideal será aquela que com os melhores níveis de desempenho em todos os indicadores, e a alternativa não ideal aquela com os piores indicadores (Kuznetsov *et al.*, 2015), ou seja, o PIS maximizará o critério de benefício e minimizará o critério de não benefício, enquanto o NIS minimizará o critério de benefício e maximizará o critério de não benefício (Chiu e Hsieh, 2016).

#### **3.4.1. Vantagens do TOPSIS**

Segundo Kalbar *et al.* (2012) as vantagens da ferramenta TOPSIS são as seguintes:

- Representa uma escala de valores das melhores e piores alternativas;
- Processo simples;
- Lógica que representa o raciocínio humano;
- Técnica eficiente na identificação da alternativa ideal para cada cenário.

### 3.4.2. Implementação da metodologia TOPSIS

De acordo com Emovon (2016) e Ioannis e Nikitas (2013) e Ahmadi *et al.* (2010b); Shih *et al.* (2007); Opricovic e Tzeng, (2004), o TOPSIS rege-se pela seguinte metodologia de aplicação:

1. Construção da matriz de decisão  $D^k$ .

Esta matriz é determinada pelas respostas do especialista,  $k$ , onde  $i$  é o conjunto de  $m$  alternativas e  $j$  é o conjunto de  $n$  critérios avaliados.

$$D^k = [x_{ij}^k]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11}^k & x_{12}^k & \dots & x_{1j}^k & \dots & x_{1n}^k \\ x_{21}^k & x_{22}^k & \dots & x_{2j}^k & \dots & x_{2n}^k \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{i1}^k & x_{i2}^k & \dots & x_{ij}^k & \dots & x_{in}^k \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{m1}^k & x_{m2}^k & \dots & x_{mj}^k & \dots & x_{mn}^k \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Nota:  $x_{ij}^k$  é a solução da alternativa  $i$  para o critério  $j$ , dado pelo especialista  $k = 1$ .

Segundo Wan *et al.* (2014); Sasi e Digalwar (2015); Gurung e Phipon (2016), a escala por onde serão cotados os critérios em relação às alternativas, terá uma dimensão de 0 a 10, exprimindo o menos conforme e o mais conforme, respetivamente, de cada critério a cada alternativa.

2. Construção da matriz de decisão normalizada  $R^k$ .

A listagem de critérios é, na maioria das vezes, conflituosa, incompatível, imensurável e não quantificável. Este processo é exequível através da normalização dos valores dos critérios para uma escala normalizada, ou  $0 \leq r_{ij}^k \leq 1$ . Para isso, é utilizada a seguinte fórmula de normalização linear dos elementos genéricos  $r_{ij}^k$ :

$$r_{ij}^k = \left\{ \left( \frac{x_{ij}^k}{x_j^{k+} - x_j^{k-}} \mid j \in J \right), \left( \frac{x_{ij}^k}{x_j^{k-} - x_j^{k+}} \mid j \in J' \right) \right\} = \frac{x_{ij}^k}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij}^k)^2}} \quad (3.9)$$

onde,  $i = 1, \dots, m$ ;  $j = 1, \dots, n$ ;  $k = 1, \dots, K$



$$x_j^{k+} = \{(\max_i x_{ij}^k | j \in J), (\min_i x_{ij}^k | j \in J')\}$$

$$x_j^{k-} = \{(\min_i x_{ij}^k | j \in J), (\max_i x_{ij}^k | j \in J')\}$$

Nota:  $J$  é o conjunto dos critérios de benefício e  $J'$  é o conjunto dos critérios de não benefício.

### 3. Cálculo da matriz de decisão Ponderada-Normalizada $V^k$ .

Os critérios influenciam as decisões consoante a sua importância. Essa importância,  $w_j$ , é **avaliada através** da matriz de comparações par a par, da **metodologia AHP**, no entanto caso o **TOPSIS seja aplicado individualmente, a importância dos critérios será avaliada segundo a experiência do investigador, onde  $\sum_{j=1} w_j = 1$ .**

O cálculo da matriz  $V^k$ , obtém-se a partir da multiplicação dos elementos normalizados da matriz  $R^k$  com a correspondente importância,  $w_j$ , de critérios:

$$V^k = [v_{ij}^k]_{m \times n} = [w_j \times r_{ij}^k]_{m \times n} \quad (3.10)$$

onde,  $i = 1, \dots, m$ ;  $j = 1, \dots, n$ ;  $k = 1, \dots, K$

### 4. Cálculo dos dois pontos cardiais PIS ( $v^+$ ) e NIS ( $v^-$ ).

$$v^+ = \{v_j^+ | j = 1, 2, \dots, n\} = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\} = \{(\max_i v_{ij} | j \in J), (\min_i v_{ij} | j \in J')\} \quad (3.11)$$

$$v^- = \{v_j^- | j = 1, 2, \dots, n\} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} = \{(\min_i v_{ij} | j \in J), (\max_i v_{ij} | j \in J')\} \quad (3.12)$$

onde,  $i = 1, \dots, m$ ;  $j = 1, \dots, n$ ;  $k = 1, \dots, K$ ;  $J$  é o conjunto dos critérios de benefício e  $J'$  é o conjunto dos critérios de não benefício.

### 5. Cálculo da distância Euclidiana entre alternativa $i$ e o ponto PIS ( $D_i^+$ ) e o ponto NIS ( $D_i^-$ ).

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, \text{ por alternativa } i = 1, \dots, m. \quad (3.13)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \text{ por alternativa } i = 1, \dots, m. \quad (3.14)$$

6. Cálculo do coeficiente de aproximação,  $C_i^*$ .

A aproximação relativa da alternativa  $i$  ao ponto PIS, é calculada através da seguinte expressão:

$$C_i^* = \frac{D_i^-}{(D_i^+ + D_i^-)} \quad (3.15)$$

onde,  $0 \leq C_i^* \leq 1$ . Caso a solução ideal seja o PIS, então  $C_i^* = 1$ .

Nota: As alternativas são hierarquizadas de acordo com a ordem decendente de valores de  $C_i^*$ , sendo as melhores alternativas as que mais se aproximam do  $C_i^* = 1$ .

### 3.4.3. Exemplo de Aplicação TOPSIS

O exemplo seguinte, a continuação do exemplo AHP, retrata uma tomada de decisão de escolha entre 4 alternativas diferentes, de acordo com os diferentes critérios de escolha (Srikrishna *et al.*, 2004):

1. Construção da Matriz de Decisão  $D^k$ .

Segundo Wan *et al.* (2014); Sasi e Digalwar (2015); Gurung e Phipon (2016), para ocorrer a avaliação de conformidade de cada critério em relação a cada alternativa, será desenvolvida uma escala de 0 a 10, ficando ao critério do decisor a dimensão da escala.

Tabela 3. 133 - Escala de Atributos Criterial

Valores	C1	C2	C3	C4
6	Suficiente	Limitada	Baixa	Caro
7	Bom	Normal	Normal	Pouco razoável
8	Muito Bom	Boa	Boa	Razoável
9	Excelente	Muito Boa	Alta	Barato

Nota: C1 é o conforto; C2 é a qualidade; C3 é a segurança; C4 é o preço.

De acordo com a Tabela 3.13, de avaliação criterial, a Tabela 3.14, Matriz de Decisão  $D^k$ , exprime a avaliação de conformidade de cada critério em relação a cada alternativa.

Tabela 3. 14 - Elementos da Matriz de Decisão D<sup>k</sup>

Alternativas	Critérios			
	C1	C2	C3	C4
W	9	8	7	9
X	7	8	7	8
Y	8	6	6	7
Z	6	9	7	6
Importância ( $w_j$ )	<b>0,330</b>	<b>0,076</b>	<b>0,104</b>	<b>0,489</b>

Nota: O valor de  $w_j$ , em relação a cada critério, no caso do modelo proposto de planeamento de manutenção desta dissertação (AHP e TOPSIS), advém do vetor de prioridade ( $C_i$ ) dos critérios, do método AHP.

## 2. Construção da matriz de decisão normalizada $R^k$ .

A normalização dos elementos genéricos, através da aplicação da fórmula de normalização linear, é exemplificada de seguida:

$$\text{Exemplo: } r_{11} = \frac{9}{\sqrt{(9^2 + 7^2 + 8^2 + 6^2)}} = 0,593 ; r_{33} = \frac{6}{\sqrt{(7^2 + 7^2 + 6^2 + 7^2)}} = 0,444$$

Tabela 3. 15 - Matriz de Decisão Normalizada R<sup>k</sup>

Alternativas	Critérios			
	C1	C2	C3	C4
W	0,593	0,511	0,517	0,593
X	0,462	0,511	0,517	0,528
Y	0,528	0,383	0,444	0,462
Z	0,396	0,575	0,517	0,396
Importância ( $w_j$ )	<b>0,330</b>	<b>0,076</b>	<b>0,104</b>	<b>0,489</b>

## 3. Cálculo da matriz de decisão Ponderada-Normalizada $V^k$ .

O cálculo da matriz  $V^k$ , obtém-se a partir da multiplicação dos elementos normalizados da matriz  $R^k$  com a correspondente importância,  $w_j$ , de critérios:

$$\text{Exemplo: } V_{31} = 0,330 \times 0,528 = 0,174 ; V_{23} = 0,104 \times 0,517 = 0,054$$

Tabela 3. 16 - Matriz de Decisão Ponderada-Normalizada  $V^k$ 

Alternativas	Critérios			
	C1	C2	C3	C4
W	0,196	0,039	0,054	0,290
X	0,152	0,039	0,054	0,258
Y	0,174	0,029	0,046	0,226
Z	0,131	0,044	0,054	0,194

4. Cálculo dos dois pontos cardiais PIS ( $v^+$ ) e NIS ( $v^-$ ).

a) O cálculo da solução ideal PIS ( $v^+$ ).

Na Tabela seguinte irão selecionar-se os maiores valores criteriosais associados aos critérios de benefício e o menor valor associado aos critérios de custo, ou seja, critérios de não benefício (C4):

Tabela 3. 17 - Escolha PIS na Matriz de Decisão Ponderada-Normalizada

Alternativas	Critérios			
	C1	C2	C3	C4
W	0,196	0,039	0,054	0,290
X	0,152	0,039	0,054	0,258
Y	0,174	0,029	0,046	0,226
Z	0,131	0,044	0,054	0,194

b) O cálculo da solução ideal NIS ( $v^-$ ).

Na Tabela seguinte irão selecionar-se os menores valores criteriosais associados aos critérios de benefício e o maior valor associado aos critérios de custo (C4):

Tabela 3. 18 - Escolha NIS na Matriz de Decisão Ponderada-Normalizada

Alternativas	Critérios			
	C1	C2	C3	C4
W	0,196	0,039	0,054	0,290
X	0,152	0,039	0,054	0,258
Y	0,174	0,029	0,046	0,226
Z	0,131	0,044	0,054	0,194

5. Cálculo da distância Euclidiana entre alternativa  $i$  e o ponto PIS ( $D_i^+$ ) e o ponto NIS ( $D_i^-$ ).

a) O cálculo da distância Euclidiana entre alternativa  $i$  e o ponto PIS ( $D_i^+$ ).

Com as soluções encontradas  $v^+ = \{0,196; 0,044; 0,054; 0,194\}$ , na Tabela 3.19 são subtraídas estas soluções aos valores de cada coluna e feito o somatório por linhas:

Tabela 3. 19 - PIS na Matriz de Decisão Ponderada-Normalizada

Alternativas	Critérios				$\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2$
	C1	C2	C3	C4	
<b>W</b>	$(0,196-0,196)^2$	$(0,039-0,044)^2$	$(0,054-0,054)^2$	$(0,290-0,194)^2$	0,009
<b>X</b>	$(0,152-0,196)^2$	$(0,039-0,044)^2$	$(0,054-0,054)^2$	$(0,258-0,194)^2$	0,006
<b>Y</b>	$(0,174-0,196)^2$	$(0,029-0,044)^2$	$(0,046-0,054)^2$	$(0,226-0,194)^2$	0,002
<b>Z</b>	$(0,131-0,196)^2$	$(0,044-0,044)^2$	$(0,054-0,054)^2$	$(0,194-0,194)^2$	0,004

Na Tabela 3.20 são calculadas as distâncias Euclidiana entre as alternativas e o ponto PIS ( $D_i^+$ ):

Tabela 3. 20 - Pontos PIS

Alternativas	$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}$
<b>W</b>	0,097
<b>X</b>	0,078
<b>Y</b>	0,042
<b>Z</b>	0,065

b) O cálculo da distância Euclidiana entre alternativa  $i$  e o ponto NIS ( $D_i^-$ ).

Com as soluções encontradas  $v^- = \{0,131; 0,029; 0,046; 0,290\}$ , na Tabela 3.21 são subtraídas estas soluções aos valores de cada coluna e feito o somatório por linhas:

Tabela 3. 21 - NIS na Matriz de Decisão Ponderada-Normalizada

Alternativas	Critérios				$\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2$
	C1	C2	C3	C4	
<b>W</b>	$(0,196-0,131)^2$	$(0,039-0,029)^2$	$(0,054-0,046)^2$	$(0,290-0,290)^2$	0,004
<b>X</b>	$(0,152-0,131)^2$	$(0,039-0,029)^2$	$(0,054-0,046)^2$	$(0,258-0,290)^2$	0,002
<b>Y</b>	$(0,174-0,131)^2$	$(0,029-0,029)^2$	$(0,046-0,046)^2$	$(0,226-0,290)^2$	0,006
<b>Z</b>	$(0,131-0,131)^2$	$(0,044-0,029)^2$	$(0,054-0,046)^2$	$(0,194-0,290)^2$	0,010

Na Tabela 3.22 são calculadas as distâncias Euclidiana entre as alternativas e o ponto NIS ( $D_i^-$ ):

Tabela 3. 22 - Pontos NIS

Alternativas	$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}$
<b>W</b>	0,066
<b>X</b>	0,040
<b>Y</b>	0,077
<b>Z</b>	0,098

#### 6. Cálculo do coeficiente de aproximação, $C_i^*$ .

A aproximação relativa das alternativas ao ponto PIS, é calculada na Tabela 3.23:

Tabela 3. 23 - Coeficientes de Aproximação

Alternativas	$C_i^* = \frac{D_i^-}{(D_i^+ + D_i^-)}$	Hierarquia
<b>W</b>	0,407	<b>3</b>
<b>X</b>	0,342	<b>4</b>
<b>Y</b>	0,648	<b>1</b>
<b>Z</b>	0,5996	<b>2</b>

Nota: As alternativas são hierarquizadas de acordo com a ordem descendente de valores de  $C_i^*$ , sendo as melhores alternativas as que mais se aproximam do  $C_i^* = 1$ .

Tabela 3. 24 – AHP vs TOPSIS

<b>Alternativas</b>	<b>Hierarquia AHP</b>	<b>Hierarquia TOPSIS</b>
<b>W</b>	<b>3</b>	<b>3</b>
<b>X</b>	<b>1</b>	<b>4</b>
<b>Y</b>	<b>4</b>	<b>1</b>
<b>Z</b>	<b>2</b>	<b>2</b>

Verifica-se, a partir da Tabela 3.24, que os resultados AHP e TOPSIS são semelhantes, mas com algumas variações, podendo afirmar-se que o TOPSIS complementa o AHP, em termos de hierarquização de alternativas, verificação de consistência de resultados, dando assim alguma validade aos mesmos. Conclui-se, então, que a escolha da melhor alternativa, de entre as alternativas e critérios disponíveis, recai sobre a alternativa Y.

#### **3.4.4. Limitações do TOPSIS**

Segundo Kalbar *et al.* (2012) as limitações são ao nível da falta de verificação de consistência dos julgamentos.

Existe, no entanto, a lógica fuzzy que, aplicada ao TOPSIS, que lhe permite lidar e quantificar variáveis incertas.





#### 4. Modelo de Suporte à Decisão na Gestão Estratégica da Condição de Ativos (MSD - GECA)

O modelo proposto de manutenção visa estudar uma alternativa viável que permita criar valor, em termos de planejamento de manutenção, a ativos no seu período de degradação, estudando várias alternativas segundo vários critérios, entre eles medidas de manutenção e custos, baseados nos sistemas que mais apresentam risco à operação dos sistemas.

O modelo apresentado (Figura 4.1) nesta dissertação terá, contudo, de seguir uma certa sequência de aplicação, constituída por três pilares, de modo a ser feita uma avaliação mais correta de todas as alternativas propostas.

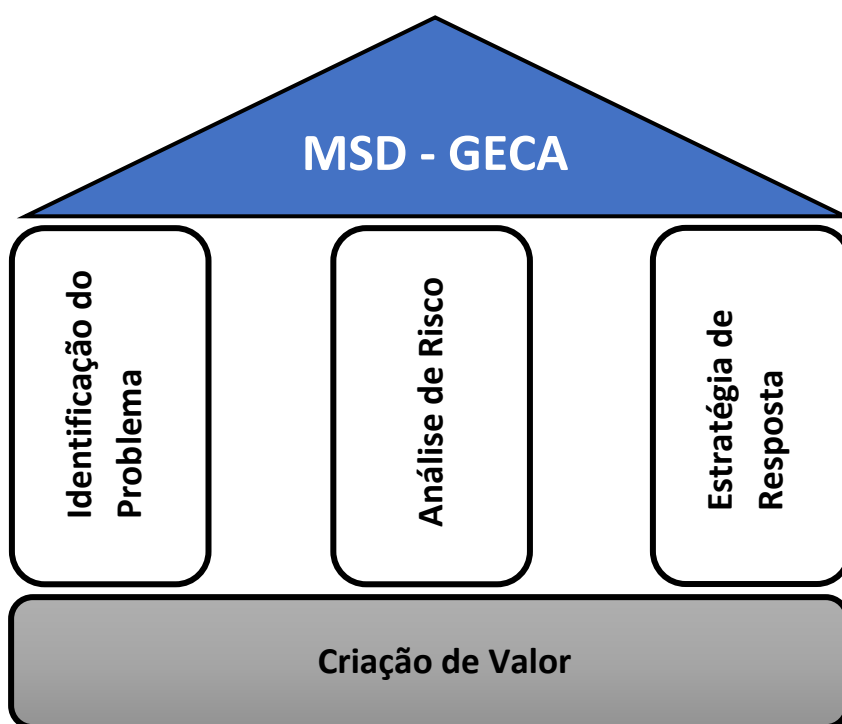


Figura 4. 1 - Etapas do MSD - GECA de Planejamento de Manutenção

O modelo proposto de planejamento de manutenção é dominado por MSD- GECA, sendo composto pelas seguintes etapas de aplicação:

1. Identificação do Problema: Identificação do objeto de estudo e objetivo(s);
2. Análise de Risco: Análise de falhas, hierarquização de falhas e ações corretivas;
3. Estratégia de Resposta: Estudo e respectivas alternativas em resposta ao problema em questão.

## **4.1.Ferramentas aplicáveis nas etapas do Modelo MSD - GECA**

### **I. Identificação do Problema**

A identificação do risco tem um papel preponderante na gestão do mesmo, e a falha na identificação do mesmo pode levar a que a organização não atinga os seus objetivos organizacionais (Rostami, 2016), então, o risco pode ser definido como a perda ou dano espetável associado à probabilidade de ocorrência de um evento indesejado (Arunraj e Maiti, 2006). Sendo que, as técnicas de identificação e gestão de risco representam uma parte importante no planeamento da manutenção através da identificação das fontes risco à operação dos sistemas e formas de redução/mitigação desse risco, em termos de falhas e acidentes.

Nesta primeira fase, o objetivo, acima de tudo, é definir o objeto de estudo, ou seja, é vital identificar o sistema ou elemento crítico que possa por em causa a continuidade de operação do caso de estudo, por fim terão de ser definidos os objetivos a serem alcançados pelo modelo, de acordo com o problema em questão.

Na Tabela 4.1, baseada em vários autores, são identificadas as ferramentas utilizadas na identificação do risco.

### **II. Análise de Risco**

Nesta etapa, de acordo com o problema e o objeto de estudo identificado, será feita uma análise aos componentes mais críticos que o constituem. Estes componentes passarão, inevitavelmente, pelos componentes que impõem um maior risco à operação do sistema, ou seja, na eventualidade de ocorrência de um modo de falha cujo impacto no sistema seja negativo ao ponto de o colocar inoperativo, criando, por consequência, grandes tempos de imobilização e, invetiváveis, custos adicionais. Por tanto, desta etapa será a de atingir o nível operacional de objetivos de manutenção.

Posto isto, através de vários autores, a Tabela 4.2 sumariza as ferramentas de análise de riscos mais utilizadas na indústria da manutenção.

Tabela 4. 1 - Ferramentas de identificação de risco

<b>Ferramentas</b>	<b>Autores</b>	<b>Foco</b>
Brainstorming	Garrido <i>et al.</i> (2011); Kansal e Sharma (2012); Grubisic <i>et al.</i> (2011); Rostami (2016)	Técnica focada na de formação e filtragem de ideias através de um grupo de pessoas.
Técnica Delphi	Garrido <i>et al.</i> (2011); Kansal e Sharma (2012); Grubisic <i>et al.</i> (2011); Rostami (2016)	Técnica que visa obter o consenso de opiniões, entre os experts, sobre futuros eventos.
Diagrama de Influência	Garrido <i>et al.</i> (2011); Ahmed <i>et al.</i> (2007); Kansal e Sharma (2012); Rostami (2016)	Representação gráfica das variáveis de decisão do problema através de nós (utilidade, decisão e informação).
Entrevista	Garrido <i>et al.</i> (2011); Kansal e Sharma (2012); Rostami (2016)	Entrevista coletiva ou individual a experts.
Checklist	Garrido <i>et al.</i> (2011); Ahmed <i>et al.</i> (2007); Kansal e Sharma (2012); Grubisic <i>et al.</i> (2011); Rostami (2016)	Listagem de pontos cruciais e pré-determinados são analisados para a existência de situações de risco.
Fluxogramas	Garrido <i>et al.</i> (2011); Kansal e Sharma (2012)	Ilustração gráfica do processo para melhor compreensão dos riscos.
Root Cause Identification/Analysis (RCA)	Garrido <i>et al.</i> (2011); Rostami (2016)	Processo gráfico de avaliação de potenciais causas de risco.
Diagramas Causa-Efeito ou Ishikawa ou Espinha de peixe	Garrido <i>et al.</i> (2011); Ahmed <i>et al.</i> (2007); Kansal e Sharma (2012); Rostami (2016)	Ilustração das interligações entre os vários fatores causadores de problemas ou efeitos.
Análise SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats)	Garrido <i>et al.</i> (2011); Grubisic <i>et al.</i> (2011); Rostami (2016)	Ferramenta de planejamento estratégico que consiste na avaliação e identificação de pontos fortes, pontos críticos, as oportunidades e os riscos.
Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA)	Ahmed <i>et al.</i> (2007); Grubisic <i>et al.</i> (2011)	Análise de modos de falha, causas, consequências para o sistema e ações de correção dos problemas.
Árvore de Falhas (FTA)	Ahmed <i>et al.</i> (2007); Grubisic <i>et al.</i> (2011)	Ferramenta visual que decompõe as falhas em eventos, <i>top-down</i> , estabelecendo relações de causa e efeito, com o intuito de identificar potenciais falhas.
Árvore de Eventos (ETA)	Ahmed <i>et al.</i> (2007)	Representação visual, <i>bottom-up</i> , das potenciais consequências das falhas a partir das falhas no sistema.
Hazard and Operability Studies (HAZOP)	Ahmed <i>et al.</i> (2007)	Palavras de verificação são atribuídas aos parâmetros do processo para identificação de problemas operacionais e de segurança.
Análise What if?	Garrido <i>et al.</i> (2011)	Técnica executada em grupo, experts do sistema ou processo em causa, de modo a levantar questões, do tipo “E se?”, para identificação de riscos e sua, respetiva, mitigação.
Revisão Documental	Rostami (2016)	Técnica de recolha de dados através da revisão da documentação existente.

A decisão da escolha da ferramenta a utilizar nesta etapa do MSD - GECA, será de acordo com o Caso de Estudo.

Tabela 4. 2 - Ferramentas análise de risco mais utilizadas na manutenção

<b>Ferramentas</b>	<b>Autores</b>	<b>Foco</b>
Simulação Monte Carlo (MCS)	Shiao (2005); Netjasov e Janic (2008); Ahmadi <i>et al.</i> (2016); Kansal e Sharma (2012)	Análise de efeitos de danos de acordo com vários parâmetros incertos.
Árvore de Eventos (ETA)	Netjasov e Janic (2008); Ahmed <i>et al.</i> (2007)	Representação visual, <i>bottom-up</i> , das potenciais consequências das falhas a partir das falhas no sistema.
Árvore de Falhas (FTA)	Netjasov e Janic (2008); Ahmed <i>et al.</i> (2007)	Ferramenta visual que decompõe as falhas em eventos, <i>top-down</i> , estabelecendo relações de causa e efeito, com o intuito de identificar potenciais falhas.
Processo Analítico Hierárquico (AHP)	Ahmadi <i>et al.</i> (2016); Kansal e Sharma (2012)	Hierarquização baseada em comparações para a par.
Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA)	Ahmadi <i>et al.</i> (2016); Cicek e Celik (2013)	Identificação de eventos críticos, suas causa e efeitos com o objetivo de maximizar a fiabilidade, segurança e custos.
Grelhas de Probabilidade e Impacto	Ahmed <i>et al.</i> (2007)	Representação em grelha da importância relativa de eventos críticos, de acordo com a sua probabilidade e o seu impacto
Estimativa da Fiabilidade do Sistema	Ahmed <i>et al.</i> (2007)	Técnica que determina a probabilidade de um elemento do sistema funcionar sem uma falha num período de tempo específico.
Métodos de Apoio à Decisão Multicritério	Ahmed <i>et al.</i> (2007)	Métodos, baseados em problemas complexos envolvendo múltiplos critérios, com o propósito de estruturação e decisão.

A decisão da escolha da ferramenta a utilizar nesta etapa do MSD - GECA, será de acordo com o Caso de Estudo.

### **III. Estratégia de Resposta**

Com o intuito elevar os resultados do modelo proposto do nível operacional para um nível estratégico de objetivos de manutenção, esta última etapa do modelo de suporte à decisão terá o objetivo identificar e eleger a alternativa final, ou seja, a mais ideal disponível, dentro os critérios e alternativas, também a definir. A decisão da escolha das ferramentas a utilizar nesta etapa do MSD – GECA, será de acordo com o Caso de Estudo, mas baseada nos Métodos de Análise de Decisão Multicritério, pois são métodos estruturados que conferem ao decisor os meios necessários para encontrar uma solução a um problema complexo, ou seja, não solucionável por critérios intuitivos (Ishizaka e Nemery, 2013; Guitouni e Martel, 1998).

## 4.2. Etapas de aplicação do MSD- GECA

Após a justificação da seleção de ferramentas a serem utilizadas no modelo proposto de planeamento de manutenção MSD - GECA (Piedade e Abreu, 2017), a Figura 4.2 demonstra quais os pilares onde assentará o modelo, bem como as várias etapas:

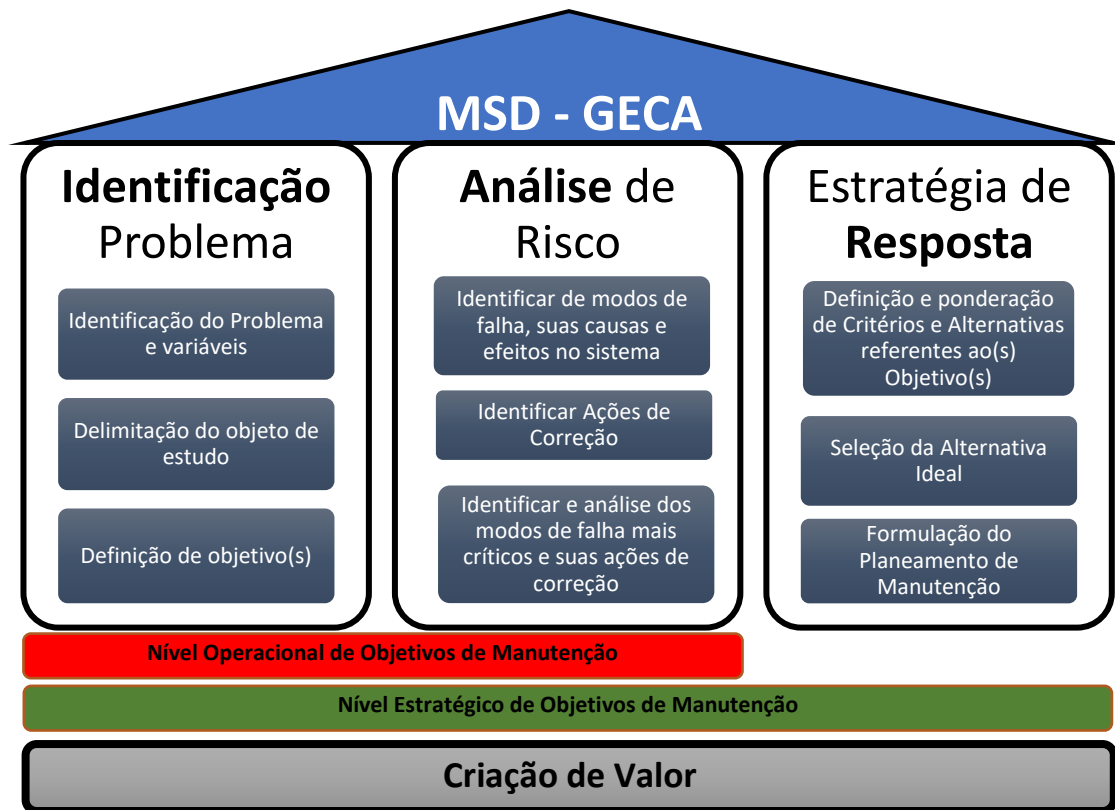


Figura 4. 2 - Pilares do Modelo de Planeamento de Manutenção MSD - GECA

Sumarizando, o MSD- GECA terá as seguintes etapas de aplicação:

### I. Identificação do Problema

- Identificação do Problema e variáveis;
- Delimitação do objeto de estudo;
- Definição de objetivo(s).

### II. Análise de Risco

- Identificação dos modos de falha, suas causas e efeitos no sistema;
- Identificação de ações de correção;
- Identificação e análise dos modos de falha mais críticos e suas ações de correção.

### III. Estratégia de Resposta

- Definição e ponderação de critérios e alternativas referentes ao(s) Objetivo(s);
- Seleção da Alternativa Ideal;
- Formulação do Planejamento de Manutenção.

Correlacionando os níveis organizacionais de objetivos de manutenção com o modelo MSD - GECA (Figura 4.3), seguindo as três etapas propostas (1º caso), este permite ao decisor elevar do nível operacional para um nível superior, no caso específico da dissertação, o estratégico. De referir que, dependendo do caso de estudo, problema e objetivos, o modelo proposto possibilita que o nível superior a atingir seja o nível tático, em vez do estratégico. No entanto, é possível manter-se apenas no nível operacional apenas completando as duas primeiras etapas do modelo (2º caso), ou então, ao completar a primeira etapa e a terceira etapa o nível de estudo manter-se-á apenas no estratégico ou tático (3º caso).

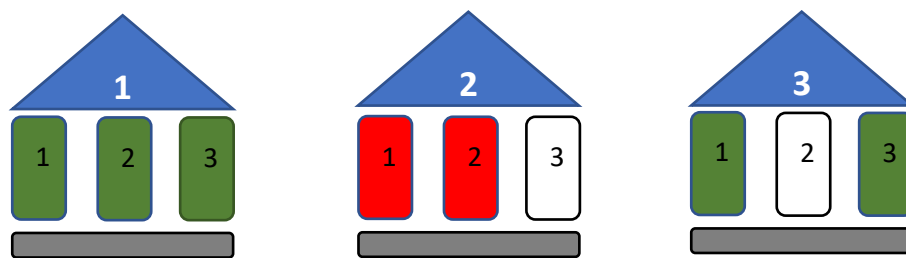


Figura 4. 3 – Correlação entre os Níveis Organizacionais e os Pilares do MSD- GECA

#### 4.2.1. Atribuição de Ferramentas ao MSD- GECA

O modelo proposto de planejamento de manutenção será aplicado a uma organização de manutenção aeronáutica que, mais especificamente, permitirá uma avaliação qualitativa e quantitativa dos componentes mais críticos de uma frota de aeronaves, em termos de potencial disponível e ações corretivas, de modo a ocorrer uma avaliação mais correta de várias alternativas que possam dar um futuro mais viável à frota de aeronaves, permitindo criação de valor em termos de planejamento de manutenção, visando a operacionalidade da mesma.

De acordo com este Caso de Estudo, serão atribuídas ferramentas de análise para suportar as etapas do Modelo de Suporte à Decisão proposto nesta dissertação.

## I. Identificação do Problema

### I.1. Diagrama Causa-Efeito ou Ishikawa

De acordo com as inúmeras ferramentas de identificação do risco, sumarizadas na Tabela 4.1, e segundo o caso particular de estudo, a ferramenta aplicada será o Diagrama Causa-Efeito, pois ilustrará de um modo mais perceptível, ao leitor, as possíveis causas que poderão contribuir para o efeito ou problema de comprometimento da continuidade de operação da frota. A aplicação da FMEA e o Diagrama Causa-Efeito, segundo Arvanitoyannis e Varzakas (2007) e Arvanitoyannis e Varzakas (2009), revela uma maior facilidade da análise FMEA quando na aplicação híbrida com o Diagrama Causa-Efeito, mas também na descoberta dos pontos chave (causas) de cada categoria.

Sendo que, a Figura 4.4 ilustra a esquemática do Diagrama Causa-Efeito:

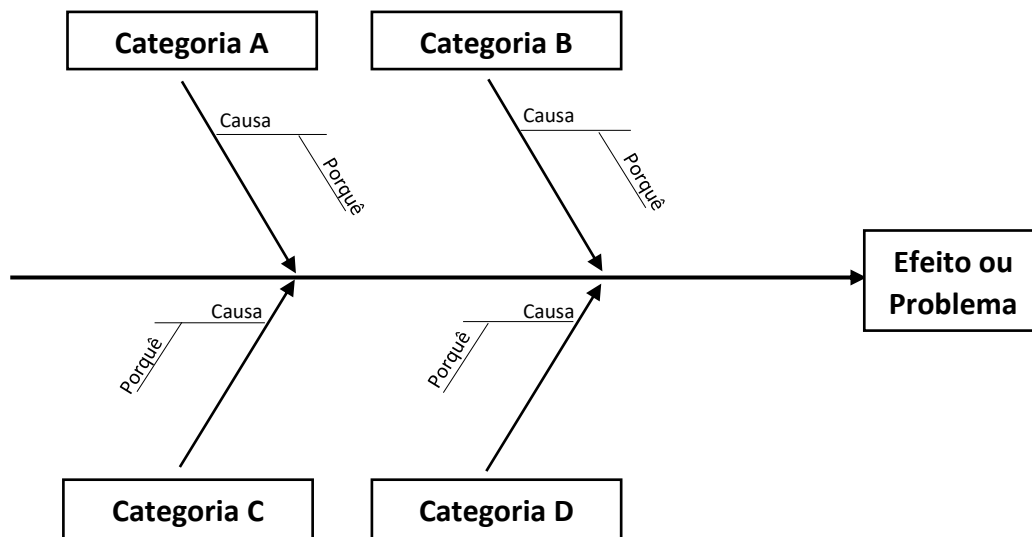


Figura 4. 4 – Representação Esquemática do Diagrama Causa-Efeito ou Ishikawa

O Diagrama Causa-Efeito pretende demonstrar as correlações entre as possíveis causas que culminam num determinado efeito ou problema (Ilie e Ciocoiu, 2010; Arvanitoyannis e Varzakas, 2007). As categorias em análise, a origem dos problemas, serão determinadas consoante o caso de aplicação e respetivas variáveis.

## II. Análise de Risco

### II.1. FMEA

Segundo as ferramentas de análise de risco, identificadas na Tabela 4.2, é selecionada a ferramenta FMEA, para executar a análise dos sistemas e funções críticas do objeto de

estudo, de modo a selecionar os modos de falha mais críticos, que mais comprometem os objetivos definidos e soluções para minimizar/mitigar esses modos de falha.

Tendo como base a filosofia RCM, uma metodologia estruturada de decisão lógica de estratégias de manutenção, cujo foco se centra, simultaneamente, pela redução dos custos de manutenção e aumento de fiabilidade e segurança, permitindo assim o desenvolvimento de planos de manutenção mais eficazes (Selvik e Aven, 2011; Lipol e Haq, 2011).

Emovon *et al.* (2016), através de vários autores, afirma que o RCM tem sido uma técnica ampla e intensivamente utilizada na seleção da estratégia de manutenção para cada modo de falha do sistema em análise. Sendo que, a filosofia RCM faz uso da FMEA, como ferramenta de identificação dos componentes e das funções que propiciam maiores riscos à operação dos sistemas, para depois, detalhadamente, identificar modos de falha, respetivas causas e efeitos, e no fim identificar ações corretivas (Ahmadi *et al.*, 2010a).

Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos é uma ferramenta de análise de risco, tal e qual o nome indica, que possibilita determinar, individualmente, os potenciais modos de falha e os respetivos efeitos de falha no desempenho e segurança do sistema (EN 60812, 2006; Lima *et al.* 2006). A FMEA, para além de permitir identificar e avaliar cada modo de falha e respetivos efeitos, permite também identificar as causas dos mesmos, tendo assim como derradeiros objetivos a maximização da segurança e fiabilidade do sistema, através da identificação de meios de prevenção e deteção dos modos de falha, bem como a determinação das tarefas de mitigação dos efeitos (Silva *et al.*, 2006; Stamatis, 2003).

A escolha desta ferramenta prende-se pelo facto de o MSG-3, a metodologia base utilizada no desenvolvimento dos programas de manutenção na aviação civil, incorporar os princípios do RCM e, ao mesmo tempo, fazer uso do processo de análise dos itens mais significativos, MSI, processo bastante similar à FMEA, diferindo apenas na análise pouco exhaustiva das consequências de falha e riscos associados (Ahmadi *et al.*, 2010a).

### **III. Estratégia de Resposta**

#### **III.1. AHP**

A ferramenta AHP é utilizada com o intuito de definir e ponderar critérios e alternativas, muitas vezes incertos e subjetivos, de acordo com o objetivo global, que possam criar valor, em termos de planeamento de manutenção, para que a análise e o resultado da



aplicação do modelo proposto de manutenção possam ser elevados de um nível operacional para um nível estratégico de objetivos de manutenção.

### III.2. TOPSIS

Nesta etapa do MSD - GECA, o objetivo será a eleição da melhor alternativa disponível, dentro dos critérios e alternativas definidos e cotados pelo AHP, focando-se na criação de valor a uma frota de aeronaves, em termos de estratégia de manutenção. Para isso, justificado anteriormente, será utilizada outra ferramenta de análise de decisão multicritério, o TOPSIS, com o intuito de selecionar a alternativa mais próxima do ideal. Pois, o AHP é definido como uma ferramenta de atribuição de valores a certos critérios, enquanto a ferramenta TOPSIS seleciona o plano de manutenção (Emovon, 2016; Certa *et al.*, 2013), podendo assim colmatar as limitações do AHP e a limitação do TOPSIS da não verificação da consistência de julgamentos, pois deste modo os critérios vindos do AHP já estarão cotados e verificados quanto à sua consistência, elevando assim os resultados ao nível estratégico organizacional de objetivos de manutenção.

Apesar do AHP, método de mensuração de valor, e o TOPSIS, método de foco no resultado, ambas permitem hierarquizar alternativas, o modelo proposto nesta dissertação irá basear-se no pressuposto, acima descrito, que o AHP irá ponderar os critérios e o TOPSIS irá selecionar a alternativa mais ideal, ou preferida. No entanto, a hierarquia de alternativas AHP será calculada, de modo a dar mais alguma validade e consistência à hierarquia de alternativas TOPSIS.

Na Figura 4.5, é ilustrada a aplicação de ferramentas aos diferentes pilares do Modelo de Suporte à Decisão na Gestão Estratégica da Condição de Ativos (MSD - GECA):

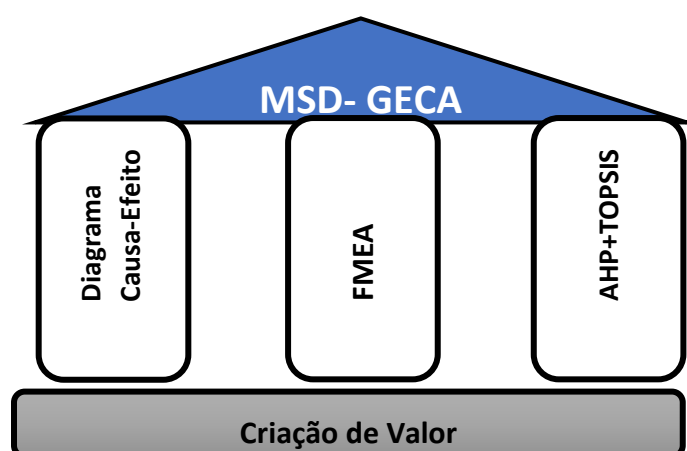


Figura 4. 5 – Ilustração de ferramentas atribuídas ao MSD - GECA

No capítulo que se segue será aplicada esta metodologia descrita a um Caso de Estudo.



## **5. Caso de Estudo - Aplicação do Modelo Proposto na Indústria de Manutenção Aeronáutica**

O modelo de planejamento de manutenção MSD - GECA será aplicado a uma organização de manutenção aeronáutica com o objetivo de avaliar várias alternativas (estratégias) que possibilitem a criação de valor à frota de aeronaves em período de degradação, dando-lhe um futuro mais viável e visando a operacionalidade da mesma.

Tendo em conta aplicação do MSD- GECA ao caso de estudo, é importante enquadrar o presente capítulo na área de manutenção aeronáutica, em termos de planejamento de manutenção e como são estruturadas as organizações de manutenção aeronáutica, tanto na aviação civil como militar.

### **5.1.Planeamento de Manutenção em Organizações de Manutenção Aeronáutica**

A manutenção é uma despesa necessária a uma organização, sendo neste caso uma organização de transportes aéreos, cuja despesa de manutenção é cotada por volta dos 13% do custo operacional (Berrittella *et al.*, 2009), fica esta, então, incumbida da difícil tarefa de encontrar medidas que permitam a diminuição dessa despesa, mantendo, no entanto, altos níveis de segurança e fiabilidade. As medidas encontradas contribuirão para uma melhoria contínua não só da manutenção, mas também da organização, influenciando positivamente a eficácia da manutenção e, em muitos casos, a sua eficiência global, melhorando assim os serviços prestados com um custo mais diminuto (MESA, 1995).

Os programas de manutenção estabelecem tarefas de manutenção e suas periodicidades, de modo a prevenir falhas ou a corrigi-las, mantendo as aeronaves em estado de aeronavegabilidade (Fiabilidade e Segurança).

Às organizações responsáveis pela aplicação da filosofia de manutenção na aviação, visando manter ou restaurar componentes aeronáuticos, de modo a assegurar a sua função,

é dado o nome de MRO, com o objetivo principal de garantir a máxima segurança dos passageiros (Vieira e Loures, 2016).

As MRO da aviação, segundo Lee *et al.* (2008), para além da missão de assegurar ou restaurar os níveis de segurança e fiabilidade dos equipamentos, através de programas e ações de manutenção, e maximizar os recursos humanos e materiais da manutenção (Kinnison, 2012), tem também como objetivo o de minimizar os custos de manutenção e os tempos de imobilização, permitindo assim maximizar a receita (Lee *et al.*, 2008), pois a fatia dos custos de manutenção representa uma parte bastante substancial nos custos totais de operação de uma aeronave, logo a seguir aos custos com o combustível (Cohen e Wille, 2006).

### **5.1.1. Planeamento e Controlo de Manutenção**

Uma organização de manutenção por mais competente e autónoma que seja, não funciona sem o elemento chave, designadamente o Planeamento e Controlo de Manutenção.

O Planeamento e Controlo é responsável por planear, organizar, calendarizar e ajustar toda a atividade de manutenção (Kinnison, 2012). O mesmo autor considera que esta sigla se refere a três funções distintas da manutenção: Programação, Planeamento e Controlo. Definindo-se estas três funções nos seguintes pontos:

- Programação: Esta função pretende prever a carga de manutenção e assegurar a atualização dessa carga de manutenção, em caso de mudanças/alterações (procedimentos, recursos, mão de obra, qualificações), para que sejam ajustados os processos e procedimentos de acordo com os requisitos;
- Planeamento: O planeamento, tal e qual o nome indica, pretende planear a carga de manutenção, em termos de tempos de execução de manutenção (potenciais), mão de obra, componentes e equipamentos. Embora idealizado, o planeamento terá de ser constantemente atualizado face aos desvios do planeamento inicial na fase de execução, algo que ocorre com alguma frequência. Sem esta função a atividade de manutenção seria impulsiva e imprevisível. O planeamento de manutenção não seria possível sem a componente de engenharia, componente essa que tem a função de desenvolver os planos de manutenção, cartas de trabalho e

definir os intervalos de manutenção (potenciais), ou seja, a função do planeamento é ajustar todas as atividades/tarefas de manutenção *in loco* definidas pela engenharia. Na Força Aérea Portuguesa, a programação de manutenção está sobre a alçada da DMSA;

- Controlo: A função de controlo tem o objetivo de controlar a toda atividade de manutenção na sua fase de execução, permitindo assim o ajuste do planeamento de manutenção caso ocorram desvios de planeamento. Estes desvios, maioritariamente causados pelos tempos de execução das ações de manutenção, são apenas estimativas teóricas. Na realidade o tempo de execução de uma ação de manutenção poderá ser afetado pela extensão dos danos na aeronave, pelas situações inopinadas de extravio de material de apoio à manutenção (equipamentos e ferramentas), indisponibilidade de mão de obra, tarefas não previstas, deficiente número de componentes em stock, ou até mesmo problemas com as instalações de manutenção. A previsão de tempo por ação de manutenção é, no entanto, mais fiável para ações de rotina, mas menos fiável para ações de rotina variáveis e por fim muito pouco fiável para ações não rotineiras. No entanto, todas estas situações permitiram que o planeamento de manutenção seja atualizado e revisto, para que futuramente estas situações sejam tidas em conta.

### 5.1.2. MSG-3 e RCM

Na aviação civil, a metodologia base utilizada no desenvolvimento dos programas de manutenção, é o *MSG-3* (Kinnison, 2012; Ahmadi *et al.*, 2010a).

Em 1978, F. Stanley Nowlan e Howard F. Heap publicam um relatório intitulado de “*Reliability Centered Maintenance*”, solicitado à United Airlines pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América. Este relatório tinha o objetivo de elaborar um estudo sobre a fiabilidade dos processos de manutenção programada (*MSG-2*) utilizados na aviação civil. O documento, por consequência, é utilizado como base para a metodologia *MSG-3: Operator / Manufacturer Scheduled Maintenance Development*, que é promulgada em 1980 e revisto em 1988 e 1993 (Moubray, 1997).

Esta metodologia tem como objetivo o de desenvolver e definir o processo geral de decisão do programa de manutenção inicial de qualquer aeronave civil, em termos de tarefas de manutenção e intervalos de intervenção, com o propósito de desenvolver o MRBR, mantendo, no entanto, os níveis de segurança e fiabilidade estabelecidos na fase de projeto (Ahmadi *et al.*, 2010a). O entanto, o mesmo autor define que a eficiência de uma manutenção de aeronaves mede-se pelos seguintes objetivos:

- Assegurar que a aeronave mantenha os níveis de segurança e fiabilidade estabelecidos na fase de projeto (inerente);
- Restaurar os níveis inerentes de segurança e fiabilidade, em caso da sua deterioração;
- Recolha de toda a informação necessária ao upgrade de desenvolvimento de componentes cuja fiabilidade inerente se tenha provado inadequada;
- Atingir os objetivos acima descritos, a um mínimo custo total.

A filosofia RCM, com um processo de decisão lógica de estratégias de manutenção tendo em conta os potenciais modos de falha que poderão causar falhas funcionais no sistema, é utilizada com o intuito de desenvolver planos de manutenção eficazes, ou seja, otimiza os requisitos da manutenção preventiva dos sistemas e equipamentos, de modo a maximizar a fiabilidade dos mesmos. É nesta base que o MSG-3 incorpora os princípios do RCM, justificando assim a sua orientação para as tarefas (Ahmadi *et al.*, 2010a), ou seja, ao executar uma análise descendente, que se foca em identificar as tarefas de manutenção mais adequadas, desde o nível do sistema até ao nível do componente, *top-down*, (Kinnison, 2012), proporcionará assim uma redução no número de tarefas de manutenção e nos tempos de imobilização de aeronaves. A Figura 5.1, representa os processos RCM e MSG-3, quanto às suas etapas de aplicação.

Pelo que, Ahmadi *et al.* (2010a), sugere o uso da FMEA, pela filosofia RCM, como ferramenta de identificação das funções que terão maiores consequências (riscos) na operação dos sistemas, para depois, detalhadamente, identificar falhas, modos de falha, suas causas, seus efeitos, e no final identificar ações corretivas, ou seja, identifica os itens significativos e estabelece as relações de dependência causa-efeito entre os parâmetros acima identificados. Sendo que, a decisão para a seleção das ações de manutenção mais adequadas terá de ser baseada nos componentes cujas consequências das falhas induzem mais risco para a operação do sistema.

A aplicação do processo de análise de decisão lógica MSG-3, juntamente com a filosofia RCM, é considerada aos componentes cujas funções são significantes o suficiente para proceder a uma análise mais exaustiva. Então, esses itens significativos são definidos como os itens cujas falhas poderão afetar a segurança operacional ou que tenham grandes consequências financeiras (Ahmadi *et al.*, 2010a; Nowlan e Heap, 1978). Após a identificação desses itens mais significativos, proceder-se-á ao processo de análise MSI. Constatando-se que, o MSG-3 incorpora os princípios do RCM, divergindo apenas na análise detalhada das consequências das falhas, onde o MSG-3 não incorpora essa análise exaustiva, já que a análise das consequências de falha e dos riscos associados terá de ser previamente executada antes da aplicação do processo de decisão lógica a cada componente, com vista à determinação das estratégias de gestão de falha.

No entanto, há autores que descrevem a metodologia RCM através da utilização do processo de análise MSI em conjunto com a FMEA, como Selvik e Aven (2011) e Misra (2008).

O processo de análise MSG-3 para a seleção de tarefas de manutenção é composto pelas seguintes etapas (Ahmadi *et al.*, 2010a):

1. Desenvolvimento do plano para o programa de manutenção;
2. Seleção do MSI (Maintenance-Significant Item);
3. Processo de análise MSI:
  - a. Identificação das funções;
  - b. Identificação das falhas funcionais;
  - c. Identificação dos efeitos das falhas;
  - d. Identificação das causas das falhas;
4. Seleção das ações de manutenção:
  - a. Avaliação das consequências das falhas;
  - b. Seleção das tarefas de manutenção, de acordo com as consequências das mesmas.
5. Implementação através do Maintenance Review Board Report (MRBR);
6. Feedback.

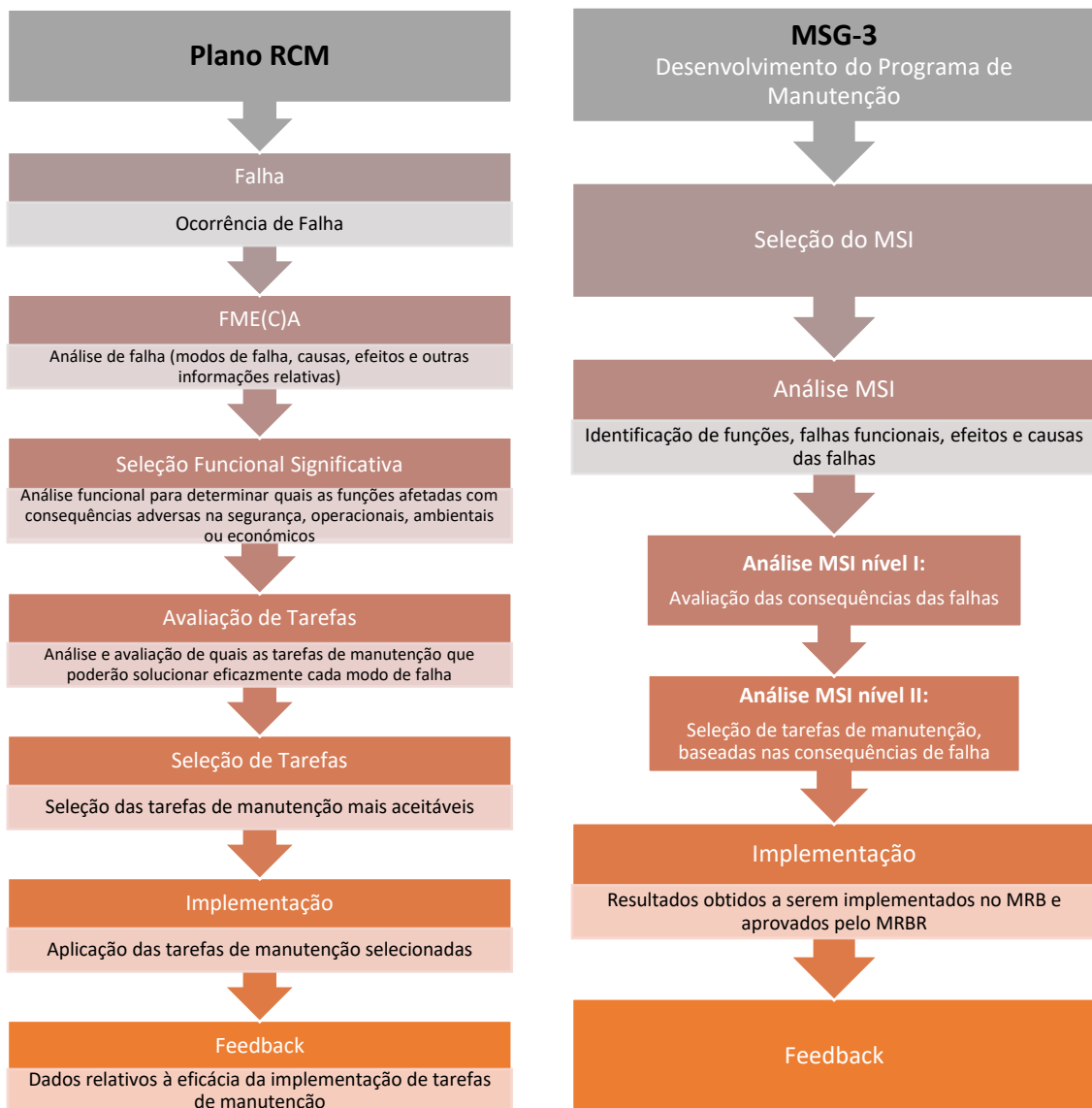


Figura 5. 1 - Processo RCM vs Processo MSG-3 (adaptado de Ahmadi *et al.* 2010a)

Segundo Kinnison (2012) e Ahmadi *et al.* (2010a), as consequências das falhas no processo de análise MSG-3 são classificadas como operacionais, económicas e de segurança, não sendo, no entanto, consideradas as consequências ambientais, algo que a filosofia RCM considera. Então, de acordo com esta classificação das consequências das falhas, o MSG-3 recomenda que a seleção das tarefas de manutenção seja feita de acordo com a seguinte listagem: Lubrificações, Inspeções Visuais, Inspeções Funcionais, Restauros (Limpeza, Substituições de componentes), Remoções e Redesign de componentes.



De realçar, a presença da filosofia RCM na fase de seleção de ações de manutenção, sendo esta seleção focada na preservação das funções do sistema e seus componentes através de manutenção preventiva, manutenção essa com o propósito de reduzir a ocorrência das falhas e de evitar as consequências destas ou, pelo menos, reduzi-las a um nível aceitável.

Em suma, o MSG-3 e a filosofia RCM podem ser vistos como semelhantes, diferindo na inclusão das consequências ambientais e na maneira como procedem à gestão do risco, já que a filosofia RCM considera as consequências e as probabilidades de falha na identificação dos itens mais significativos, no entanto o MSG-3 apenas considera antecipadamente as consequências de falha.

### **5.1.3. Maintenance Review Board Report**

Com base na análise MSG-3, a MRB, composta por fabricantes, operadores e autoridades reguladoras, elabora um programa inicial de manutenção para uma aeronave específica. Este programa ao ser aprovado pela autoridade competente (EASA/FAA), passa a denominar-se por MRBR.

O MRBR define os requisitos mínimos iniciais da manutenção programada/inspeções, de maneira a apoiar o operador da aeronave no desenvolvimento de um programa de manutenção específico da aeronave, de acordo com as suas especificações (Ahmadi *et al.*, 2010a). Sendo que, a constituição do MRBR envolve três entidades:

- MRB: Organização constituída pelos operadores da aeronave (companhia aérea), fabricantes da fuselagem e motores, e Autoridades Reguladoras, tem a função de aprovação final do programa inicial de manutenção de uma aeronave específica.
- ISC: Comité composto por representantes dos operadores e fabricantes, que tem a função de estabelecer a política de manutenção (definir objetivos).
- MWG: Grupos de trabalho compostos por especialistas de manutenção representantes dos operadores, fabricantes e autoridades reguladoras, com o objetivo de aplicar a lógica MSG-3 para que sejam determinadas as tarefas de manutenção e respetivos intervalos de intervenção, para a aeronave em questão.

O MRBR consiste em três grupos de trabalho especializados em tarefas de manutenção programadas (Estruturas, Sistemas e Zonal), que de acordo com a lógica MSG-3 lhes permitirá desenvolver um programa de manutenção específico para a aeronave em questão (Kinnison, 2012).

#### **5.1.4. Maintenance Planning Document**

O MPD é o documento, de manutenção programada, elaborado pelo fabricante (Kinnison, 2012) que as companhias aéreas utilizam para desenvolver um plano de manutenção específico (Muchiri e Smit, 2011).

Segundo Kinnison (2012), na Boeing, este documento é chamado de *Maintenance Planning Data* (MPD). Na McDonnell-Douglas é apelidado de *On Aircraft Maintenance Planning* (OAMP). Na Airbus a este documento dá-se o nome de *Maintenance Planning Document* (MPD).

Este documento engloba os requisitos do MRB e define as tarefas e os intervalos de manutenção (Muchiri e Smit, 2011), sendo que as tarefas são escalonadas (*Letter Check*) e os intervalos (potenciais) definidos por horas de voo, ciclos de voo ou calendário (dias, semanas, meses, anos) (Kinnison, 2012; Muchiri e Smit, 2011). Estas tarefas de manutenção estão definidas nos:

- CMR: Procedimentos obrigatórios de manutenção preventiva estabelecidos aplicados a certos componentes/sistemas, de modo a prevenir certos problemas.
- AL: Regulamentos que aprovam a introdução de práticas de manutenção preventiva, estabelecidas no CMR.

Segundo Muchiri e Smit (2011) e Kinnison (2012), as tarefas/ações de manutenção definidas neste documento, apresentam o seguinte caráter:

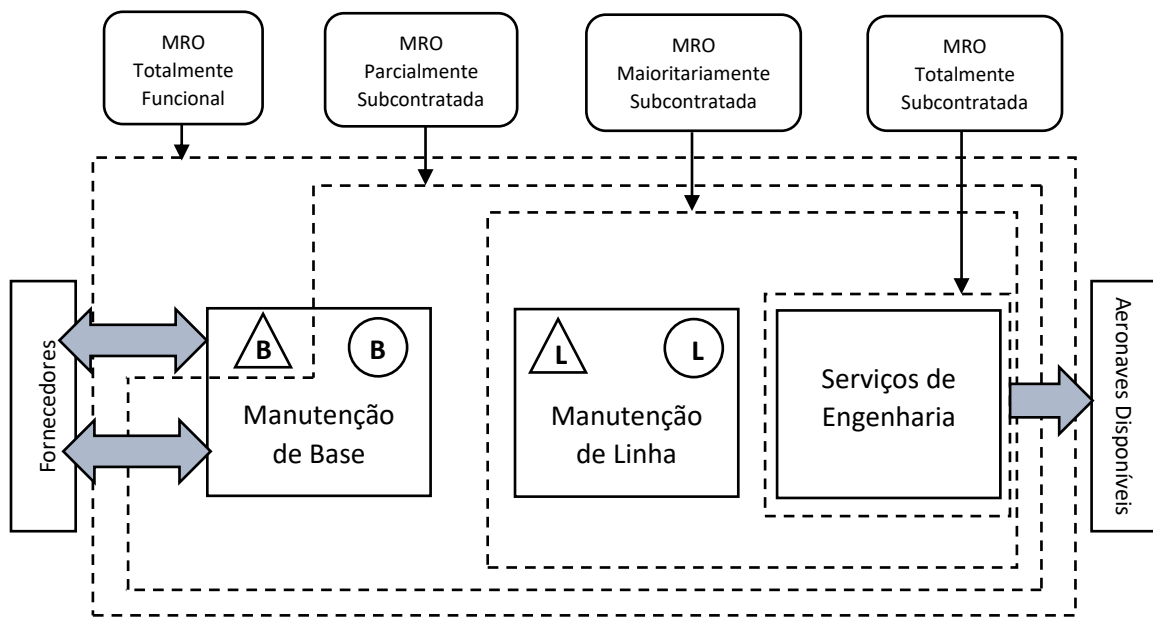
- Tarefas de Rotina: correspondem às ações de manutenção planeadas e executadas num intervalo de tempo específico (potencial), como as inspeções da aeronave.
- Tarefas Não Rotineiras: correspondem às ações de manutenção não programadas que advêm de outras tarefas de manutenção programadas (rotina).

Kinnison (2012) define, também, um outro caráter, as tarefas de manutenção de Rotina Variáveis. Estas correspondem à substituição de componentes sem potencial

remanescente (Tempo Limite Potencial), e à inclusão de procedimentos de manutenção emanadas pelas autoridades aeronáuticas e pelo fabricante, como os AD's e os SB's, respetivamente. Segundo Ackert (2010), a esta junção de tarefas definidas no CMR e AL, com os AD's e SB's, é formado o AMP, sendo este um documento que delinea a rotina programada de manutenção que por si terá de ser transformada em procedimentos de manutenção, obtendo-se assim o AMM.

### 5.1.5. Níveis de Manutenção

Nos dias de hoje, a classificação das Organizações de MRO é feita consoante o seu nível de subcontratação de serviços de manutenção. Esta classificação é constituída por quatro níveis, podendo ir desde o Totalmente Funcional, onde os serviços de manutenção estão todos concentrados na organização, até ao Totalmente Subcontratada, onde a organização subcontrata todos os serviços de manutenção (McFadden e Worrells, 2012; Vieira e Loures, 2016), ilustrado na Figura 5.2:



Legenda:      **B** - Manutenção de Base                      **L** - Manutenção de Linha  
                   - Stock Material                      - Manutenção

Figura 5. 2 -Classificação Organizacional das MRO (adaptado de McFadden e Worrells, 2012; Vieira e Loures, 2016)

Esta escolha de subcontratação dependerá obviamente da estratégia da organização (MRO), que permitirá a subsistência do negócio a longo prazo, e do custo de manutenção, conseqüente dessa escolha. A subcontratação dotará, portanto, a organização de certas valências ou capacidades que não estão ao seu alcance.

Nos modelos Totalmente Funcionais todas as capacidades de manutenção estão integradas na MRO, podendo ser estendidas as suas capacidades de manutenção a outras companhias aéreas. Nos modelos Parcialmente Subcontratados a maioria das necessidades da MRO são satisfeitas internamente, onde poucos são os serviços subcontratados. Nos modelos Maioritariamente Subcontratados as necessidades são subcontratadas, excluindo atividades críticas de manutenção. Nos modelos Totalmente Subcontratados todas as atividades de manutenção são subcontratadas.

Existem os modelos de negócio chamados de OEM, ou seja, um modelo onde o fabricante (ex: Airbus, Boeing) vende o seu produto com um pacote essencial de serviços (pacotes de manutenção) – ex: GoldCare da Boeing e TotalCare da Rolls-Royce (Ayeni *et al.* 2011).

Em termos de níveis de manutenção, normalmente adotada pelas companhias de bandeira, segue a seguinte divisão de níveis de manutenção preventiva (Vieira e Loures, 2016; Kinnison, 2012; Muchiri e Smit, 2011; Lee *et al.*, 2008):

- Manutenção de Linha: As inspeções de Linha são caracterizadas pelas intervenções de manutenção realizadas em curtos períodos de tempo, pelo pequeno número de ações de manutenção, mas também pelo seu reduzido nível de profundidade de intervenção, por outras palavras, as inspeções que requerem menor esforço de manutenção. No entanto, estas inspeções, normalmente distribuídas por blocos de inspeção, designam-se por *Letter Checks* (Alfares, 1999; Kinnison, 2012; Sriram e Haghani, 2003; Ayeni *et al.*, 2011; Vieira e Loures, 2016), das quais estão incluídas na manutenção de linha as *Letter Checks*:
  - ✓ Tipo A (500 Horas de Voo ou 2 Meses): Geralmente inclui a abertura de acessos para inspecionar certos componentes, as inspeções visuais quanto ao estado da fuselagem (deformações, danos, corrosão, luzes), lubrificações e verificação nos acumuladores de pressão dos travões;

- ✓ Tipo B (1100 Horas de Voo): Executadas com um maior detalhe que nas inspeções do Tipo A, podendo recorrer a equipamentos ou testes para realização de testes funcionais;
- ✓ Inspeções de Trânsito, Diárias ou de 48 Horas: Consistem em inspeções visuais, inspeções antes de voo, inspeções após voo, verificação dos níveis de óleo do APU, verificação do nível do fluido hidráulico da aeronave, verificação do estado de pneus e travões.
- Manutenção de Base: As inspeções de Base são caracterizadas pela sua natureza mais complexa, pois requerem de mais tempo de intervenção e, conseqüente, incremento no tempo de imobilização da aeronave. Normalmente, é executada em hangar, pois requerem de um maior número equipamentos, mão de obra e de especialização, ou seja, maior esforço de manutenção. No entanto, estas inspeções, normalmente distribuídas também por blocos de inspeção, designam-se, tal e qual na Manutenção de Linha, por *Letter Checks*, das quais estão incluídas (Alfares, 1999; Kinnison, 2012; Sriram e Haghani, 2003; Ayeni *et al.*, 2011; Vieira e Loures, 2016):
  - ✓ Tipo C (4000 Horas de Voo ou 20 Meses): Uma inspeção mais extensa e de caráter funcional a cada sistema e seus componentes, o que poderá levar a um tempo de imobilização da aeronave de 3 a 5 dias. Esta inspeção do Tipo C inclui as inspeções do Tipo A, B e Diárias.
  - ✓ Tipo D (25000 Horas de Voo ou 6 Anos): Denominada de inspeção estrutural, esta é um tipo de inspeção bastante extensa e exaustiva, pois inclui a execução dos diferentes tipos de ensaios não destrutivos de maneira a identificar deformações na estrutura, fendas, corrosão e outros sinais de deterioração estrutural. Esta inspeção poderá imobilizar a aeronave no mínimo 20 dias. A realização desta inspeção pressupõe a realização das inspeções do Tipo A, B, C e Diárias.

Segundo Kinnison (2012), com a introdução do Boeing 777, o MSG-3 sujeito a uma revisão, sendo que o planeamento por blocos de inspeção foi otimizado para blocos faseados ou equalizados, permitindo assim uma distribuição mais equilibrada da carga de trabalho (eficácia de manutenção) – a título de exemplo: anteriormente para executar a inspeção C teria que se esperar que a inspeção A e depois a B estivessem terminadas, neste momento a inspeção C pode começar ao mesmo tempo que a A e B.

Para além das Manutenções de Linha e de Base, em adição, McFadden e Worrells (2012); Ayeni *et al.* (2011); Kinnison (2012), consideram também que uma organização de manutenção aeronáutica, normalmente adota a seguinte divisão setorial em termos de manutenção:

- Revisão Geral de Motores: O nível de profundidade de intervenção deste tipo de manutenção difere das rotineiras inspeções de base, pois aqui os motores das aeronaves são reparados por completo;
- Revisão Geral de Componentes: Como acontece na área de motores, aqui o nível de profundidade de intervenção é também muito profundo, sendo que nesta área são reparados por completo os vários componentes estruturais desde os trens de aterragem às fuselagens;
- Aviónicos: Área especializada na revisão geral dos componentes aviónicos das aeronaves.

O outro tipo de classificação das Organizações de MRO, adotada pelas companhias *low cost*, que tendem em não investir numa organização de manutenção pesada ou muito extensa, ou seja, optam pela subcontratação de serviços. Esta medida permitirá a redução de custos, subcontratam serviços de manutenção a outras organizações independentes, chamado outsourcing (Vieira e Loures, 2016; Cohen e Wille, 2006).

### **5.1.6. Regulamentos de Manutenção Aeronáutica**

A manutenção na indústria aeronáutica é extremamente regulamentada por diversas autoridades de aeronavegabilidade, estas organizações regulamentam os padrões na aviação, maioritariamente na europa, é a EASA, nos Estados Unidos da América, a FAA, e em Portugal, a ANAC. No entanto, estas organizações são padronizadas através de anexos, SARPs e PANS, produzidos pela organização ICAO, que visa padronizar, internacionalmente, normas e regulamentos respeitantes à segurança e eficiência na aviação civil. Com base nestes SARPs e PANS, as autoridades de aeronavegabilidade promulgam normas de aeronavegabilidade com os requisitos necessários a atingir (ICAO, 2017; Florio, 2012).

No caso da ANAC, cabe a esta organização assegurar (licenciamento, certificação, autorização e supervisão) que a indústria aeronáutica civil portuguesa se encontra conforme os regulamentos promulgados pela EASA (ANAC, 2017).

O regulamento (UE) n.º 1321/2014, da Comissão, de 26 de novembro de 2014, “*estabelece os requisitos técnicos e procedimentos administrativos comuns destinados a assegurar a manutenção da aeronavegabilidade das aeronaves, bem como quaisquer componentes destinados a instalação nas mesmas*”. Sendo que, na manutenção aeronáutica, na Europa, os regulamentos mais usuais são (Hampson *et al.*, 2012):

- EASA Parte 66 – Requisitos para certificação de mecânicos aeronáuticos;
- EASA Parte 145 – Certificação de organizações de manutenção aeronáutica;
- EASA Parte 147 – Requisitos das organizações para formação e certificação de mecânicos aeronáuticos (ao nível do EASA Parte 66);
- EASA Parte M – Requisitos para Continuidade da Aeronavegabilidade;
  - Subparte F – Requisitos para certificação de Organização de Manutenção;
  - Subparte G – Requisitos para certificação de Organizações de Gestão da Continuidade da Aeronavegabilidade.

### **5.1.7. Manutenção Aeronáutica Militar**

Na indústria aeronáutica militar, mais propriamente na Força Aérea Portuguesa, o conceito de manutenção de aeronaves é determinado pelos programas de manutenção definidos pelos respetivos fabricantes, estando, no entanto, estruturado em três níveis de manutenção, sendo estes níveis definidos segundo a complexidade de intervenção de manutenção (Vicêncio, 2017), definido no REMAFA de 1981:

- Primeiro Escalão: Chamada de manutenção de linha (Kinnison, 2012) na aviação civil, e manutenção de linha da frente na aviação militar. Este nível de manutenção corresponde a tarefas de curta duração, reparações ligeiras, substituições de órgãos ou LRU e normalmente executadas no local de estacionamento das aeronaves. A título de exemplo, destacam-se as inspeções diárias, inspeções antes de voos, inspeções entre voos, reboques, reabastecimentos de combustível, verificação de níveis de óleo, lavagens e lubrificações;

- Segundo Escalão: Este nível de manutenção, sendo mais profundo que o primeiro nível, corresponderá a tarefas de manutenção de maior duração e, conseqüentemente, maiores tempos de imobilização de aeronaves, como tal para a sua execução requerem instalações fixas (Hangar) e um maior número de meios (humanos e materiais). A título de exemplo, destacam-se as IPP, reparações de anomalias, substituição de equipamentos e motores, cumprimento SB's, cumprimento de ordens técnicas, ensaios não-destrutivos, tratamentos anticorrosivos, calibrações e ensaios;
- Terceiro Escalão (*Depot*): Este nível de manutenção, mais pesada, requer meios técnicos mais complexos e mão de obra mais especializada, pois o seu nível de intervenção é muito profundo na estrutura das aeronaves, correspondendo a revisões gerais, modificações, grandes reparações, fabrico de peças e ainda a recuperação de componentes e sistemas. Este nível de manutenção implica longos períodos de imobilização das aeronaves e, na maioria das vezes, esta manutenção é executada pelos fabricantes ou por empresas subcontratadas, por exceder a capacidade de manutenção da organização de onde as aeronaves provêm.

Os níveis acima definidos, são enquadrados numa tipologia de manutenção programada ou preventiva, no entanto, existe uma outra tipologia de manutenção que não está escalonada, devido à sua natureza, chamada de manutenção não programada. Esta última, é uma tipologia de manutenção que desencadeia uma ação reativa perante uma falha ou avaria.

Porém, este tradicional escalonamento de manutenção não se verifica em todas as aeronaves da Força Aérea Portuguesa, pois em aeronaves mais recentes o conceito de manutenção tem vindo a aproximar-se mais do conceito de manutenção na aeronáutica civil, através da fragmentação de manutenção, com pacotes de inspeção mais pequenos e com o intuito de reduzir os tempos de imobilização (Vicêncio, 2017).

De referir que, para uma boa Programação e Planeamento de manutenção deverá ter em especial atenção a limitação do recurso homens/hora, de modo a que não hajam quebras de produtividade de manutenção.



## **5.2.Caraterização do Caso de Estudo**

O Estudo de Caso desta dissertação tem como objetivo a aplicação do modelo proposto de planeamento de manutenção, aplicação essa na indústria aeronáutica militar, mais especificamente à Esquadra 103 da Força Aérea Portuguesa. Só serão revelados os dados que não comprometam a integridade e segurança da organização.

A Missão primária da Força Aérea Portuguesa é gerar poder aéreo. Este poder aéreo materializa-se nas operações de Busca e Salvamento (SAR), Vigilância e Reconhecimento, Transporte Aéreo e Defesa Aérea do espaço nacional, este último, em grande parte, advém da capacidade de formação de pilotos de combate, por parte da Força Aérea Portuguesa, cuja missão é atribuída à Esquadra 103, sediada na Base Aérea N°11, em Beja. Para cumprimento da sua missão, a Esquadra 103, ministra o Curso da Fase Avançada Em Aviões de Reação (FAAR) e o Curso da Fase Complementar para Aviões de Combate (FCAC). Ministra também o Curso de Instrutor da Fase Avançada em Aviões a Reação (CIFAAR), permitindo assim a autorregeneração de pilotos instrutores.

Para assegurar a sua missão, a Esquadra 103 opera o Sistema de Armas Alpha Jet, ao serviço da Força Aérea Portuguesa desde 1993, ano em que foram recebidas e atribuídas 50 aeronaves às Esquadras 103 e 301. Contudo, estas 50 aeronaves ultrapassavam as necessidades de exploração operacional destas Esquadras, levando, por consequência, à redução do número de aeronaves atribuídas, permitindo assim o reaproveitamento dos componentes das aeronaves retiradas de serviço. Atualmente estão atribuídas cinco aeronaves à Esquadra 103.

O plano específico desenvolvido, pela Força Aérea Portuguesa, para a sustentabilidade da frota Alpha Jet, refere que a mesma deverá ser explorada até à exaustão, até janeiro de 2018, estando neste momento no período de Phase-Out, assumindo que depois de janeiro de 2018, a frota Alpha Jet deixará de operar. Após 2018, as soluções propostas de acordo com o plano específico desenvolvido passam pela modernização da frota ou pela sua substituição por outro sistema de armas, não estando, até ao momento, definida uma solução.

### 5.2.1. Sistema de Armas Dassault-Dornier Alpha Jet

No final dos anos 60, a Dassault-Bréguet (França) e a Dornier (Alemanha) decidem desenvolver uma nova aeronave para treino avançado e apoio aéreo, surgindo os primeiros protótipos nos anos de 1973-1974, tendo sido alcançada a produção da aeronave em novembro de 1977. A esta aeronave foi dado o nome de Alpha Jet, possuindo 6 versões, aeronave do tipo caça bombardeiro, cuja função abrangia as áreas de apoio aéreo ofensivo, apoio de superfície e instrução avançada operacional. A Figura 5.3 ilustra algumas das características/capacidades da aeronave:

Peso Vazio - 3550 Kg  
Peso Máximo à Decolagem - 7500Kg  
Dimensões:  
    Envergadura – 9,114 m  
    Comprimento – 12,465 m  
    Altura – 4,190 m  
Performance:  
    Velocidade Máxima – 1160Km/h (Mach 0,86)  
    Distância de Decolagem – 400 m  
    Distância de Aterragem – 520 m  
    Teto de Serviço – 50000 Pés  
    Alcance (com depósitos externos) – 2600 Km  
    Autonomia (Baixa Altitude) – 02H00  
    Autonomia (Alta Altitude) – 03H00

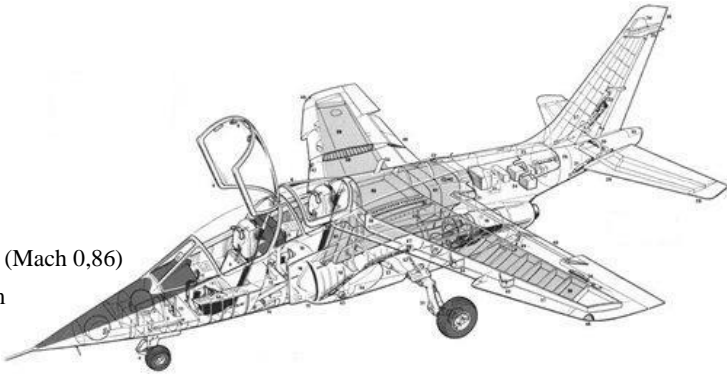


Figura 5. 3 - Características/Capacidades da Aeronave Alpha Jet

Esta aeronave é equipada por dois motores Larzac 04 C20, cujo impulso é na ordem dos 3200 lbf (14 KN), por cada motor.

Este tipo de aeronave tem incorporado um sistema de ejeção, cuja cadeira é a STENCEL SIIS-3 AJ, com a particularidade do tipo de ejeção 0-0, ou seja, a ejeção é possível aos 0 km/h e aos 0 metros de altitude. A ejeção é executada num tempo de ejeção de cerca de 1,83s, com uma aceleração de 17,5G e até uma altura de 30 m.

O sistema de armamento é composto por um canhão Mauser BK27, de 27mm, e com um sistema de Chaff e Flares, ALE40.

Existe também a possibilidade de guerra eletrónica com diversos mecanismos.

## 5.2.2. Manutenção da Esquadra 103

### Funções de Planeamento e Controlo

Na manutenção da Esquadra 103, Alpha Jet, definido no MCA 305-5 “Organização da Base Aérea Nº11” (2011), as três funções de Programação, Planeamento e Controlo da manutenção estão atribuídas e repartidas pelo Oficial de Manutenção e pela Área de Planeamento e Controlo. De acordo com a Figura 5.4, podem verificar-se os níveis de dependência entre si.

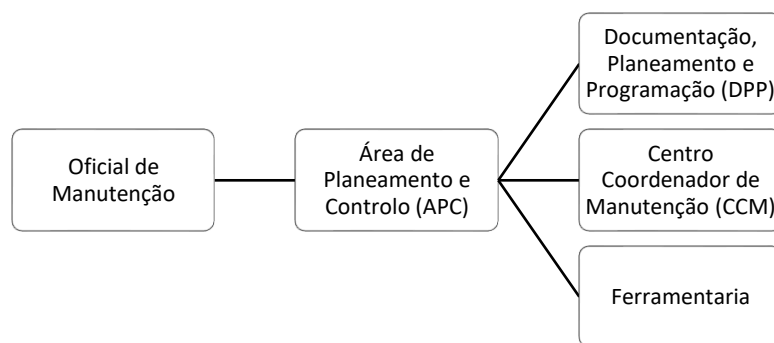


Figura 5. 4 - Funções de manutenção da Esquadra 103 (adaptado de MCA 305-5, 2011)

De seguida, enumeram-se as suas competências:

**Oficial de Manutenção** - O chefe da manutenção, o responsável pelo cumprimento da missão de Manutenção, tendo como competências garantir o planeamento, controlo e análise das atividades de manutenção. Tem ainda como função determinar a carga de manutenção e regime de exploração das aeronaves.

**Área de Planeamento e Controlo (APC)** – Esta área tem a função de controlar o cumprimento da toda a atividade de manutenção e manter o seu registo histórico:

- Secção de Documentação, Planeamento e Programação (DPP) – Esta secção tem como competências o planeamento e programação atempadamente das tarefas mensais e semanais de manutenção programadas. Tem também a função de manter a situação da aeronave atualizada, em termos de registos de manutenção.
- Centro Coordenador de Manutenção (CCM) - A este órgão estão atribuídas as tarefas de coordenação das ações de manutenção, em termos do estado de execução dos trabalhos de manutenção, movimentação e disposição das aeronaves

em hangar e/ou placa. Na eventual necessidade de meios (humanos e materiais) para a execução de manutenção, requisita e coordena a sua atribuição, com os órgãos da unidade aérea.

- Ferramentaria - Esta secção tem como tarefas o armazenamento, planeamento e o controlo da distribuição de materiais e ferramentas de apoio à manutenção.

De referir que, todos os dados de manutenção na Força Aérea Portuguesa são registados numa aplicação informática, introduzida em 2015, chamada PLUS-MGM. Esta aplicação permite o registo das ações de manutenção executadas em cada aeronave, identificação dos intervenientes e secções envolvidas, controlo de horas de mão de obra, identificação das datas dos trabalhos executados, tipos de avarias, ações tomadas, componentes envolvidos, controlo de HV das aeronaves, previsão de ações de manutenção, entre outros dados de manutenção essenciais a um bom planeamento e controlo de manutenção.

### Estrutura de Manutenção

A manutenção da Esquadra 103 é subdividida em três grandes áreas: Área de Inspeções e Reparações, Área de Aprontamento e Área de Planeamento e Controlo (Figura 5.5):

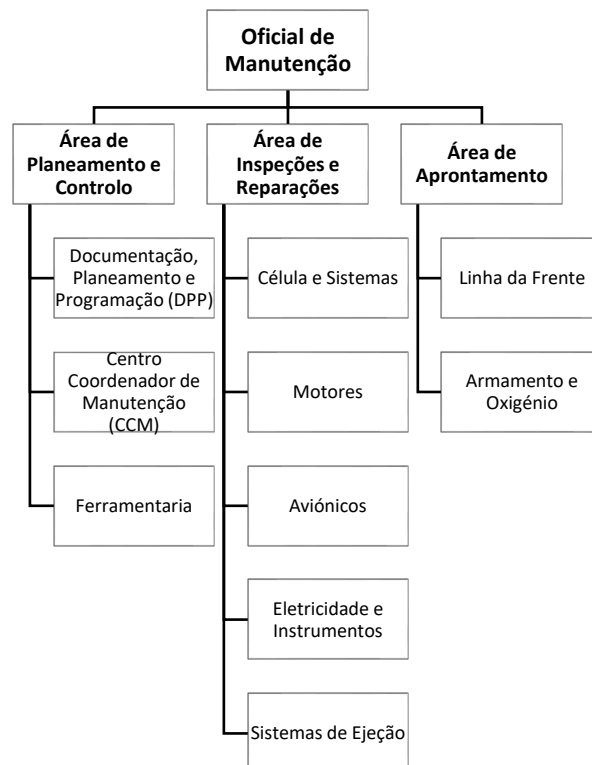


Figura 5. 5 - Estrutura de Manutenção da Esquadra 103

O conceito de manutenção aplicado na Aeronave Alpha Jet é dividido em manutenção programada (inspeções) e corretiva (reparação de anomalias), sendo grande parte deste conceito aplicado na Área de Inspeções e Reparações, subdividida nas secções:

- Célula e Sistemas: Manutenção programada através de IPP com frequência de 250 HV (2º escalão), havendo, no entanto, capacidade de execução da inspeção designada de DI, inspeção de 3º escalão à célula das aeronaves, com frequência de 2000 HV ou 10 Anos de operação. Manutenção não programada é compreendida pelas reparações de anomalias e execução de SPs. Estas inspeções especiais são executadas devido a condições específicas, sendo, no entanto, também originadas por horas de voo e tempo de calendário.
- Motores: Manutenção programada é efetuada aos oito módulos dos motores que equipam o Alpha Jet, Larzac 04 C20. Sendo que, só é possível efetuar manutenção de 2º escalão a alguns dos módulos dos motores, baseando-se em substituição de componentes.
- Eletricidade e Instrumentos: Manutenção programada inserida nas IPP de célula.
- Aviónicos: A manutenção programada aos Sistemas Aviónicos está inserida nas IPP de célula e, também, na manutenção programada a certos componentes.
- Sistemas de Ejeção: As atividades de manutenção programada aos Sistemas de Ejeção derivam de programas de manutenção próprios dos sistemas de ejeção, controlados por tempo de calendário. Existe também capacidade de efetuar manutenção de 3º escalão há cadeira de ejeção e a alguns componentes da mesma.

Por fim, na Área de Aprontamento:

- Linha da Frente: As atividades de linha baseiam-se em inspeções de curta duração, como por exemplo as inspeções antes de voo, inspeções entre voos, inspeções depois de voo, lubrificações, mudança de pneus e/ou blocos de travões, carregamento de amortecedores e dos sistemas hidráulicos, etc.
- Armamento e Oxigénio: Esta área tem como um dos objetivos as atividades de linha da frente na área do oxigénio, fornecimento de oxigénio líquido às aeronaves. Em termos de manutenção programada, para além de inserida nas IPP, tem também manutenção à parte aos sistemas de oxigénio e aos sistemas de armamento.

No anexo A, estão discriminadas todas as IPP executadas à aeronave Alpha Jet.

### 5.3. Aplicação do Modelo de Suporte à Decisão na Gestão Estratégica da Condição de Ativos (MSD - GECA)

#### I. Identificação do Problema

##### I.1 Diagrama Causa-Efeito

Com o fim anunciado, a Força Aérea Portuguesa definiu, para a Esquadra 103, um regime de esforço de 800 HV para o ano de 2017, tendo em vista a finalização do corrente curso de pilotagem que englobará o Curso da Fase Avançada Em Aviões de Reação (FAAR) e o Curso da Fase Complementar para Aviões de Combate (FCAC). O aumento deste regime de esforço, em comparação com a média de HV de anos anteriores (Figura 5.6), explica-se com a tentativa de finalização mais rápida dos cursos de pilotagem, nos dois semestres de 2017, e requalificação de instrutores, mas também para um aproveitamento mais eficaz do potencial disponível dos constituintes das aeronaves, sem serem necessárias mais inspeções às células e motores das aeronaves.

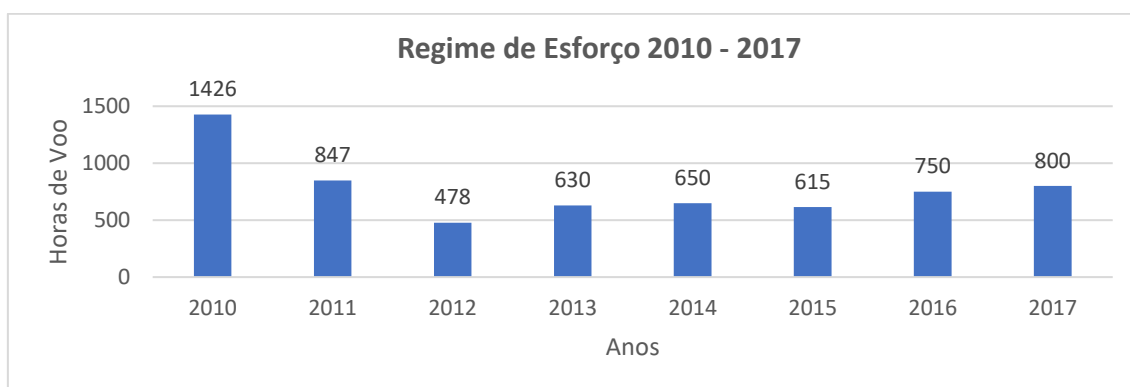


Figura 5. 6 - Regime de Esforço Anual da Esquadra 103

Neste momento, respeitando o regime de esforço, a Esquadra 103 chegará ao início de 2018 com 5 aeronaves, contemplando um potencial remanescente de 237 HV, sem realizar mais nenhuma IPP, distribuído pelas 5 células das aeronaves.

De seguida, na Figura 5.7 são apresentados os critérios, e respetivas causas, que mais limitações representam à exploração do Sistema de Armas Alpha Jet, como as Células, os Motores, os Materiais e o critério da Decisão Organizacional:

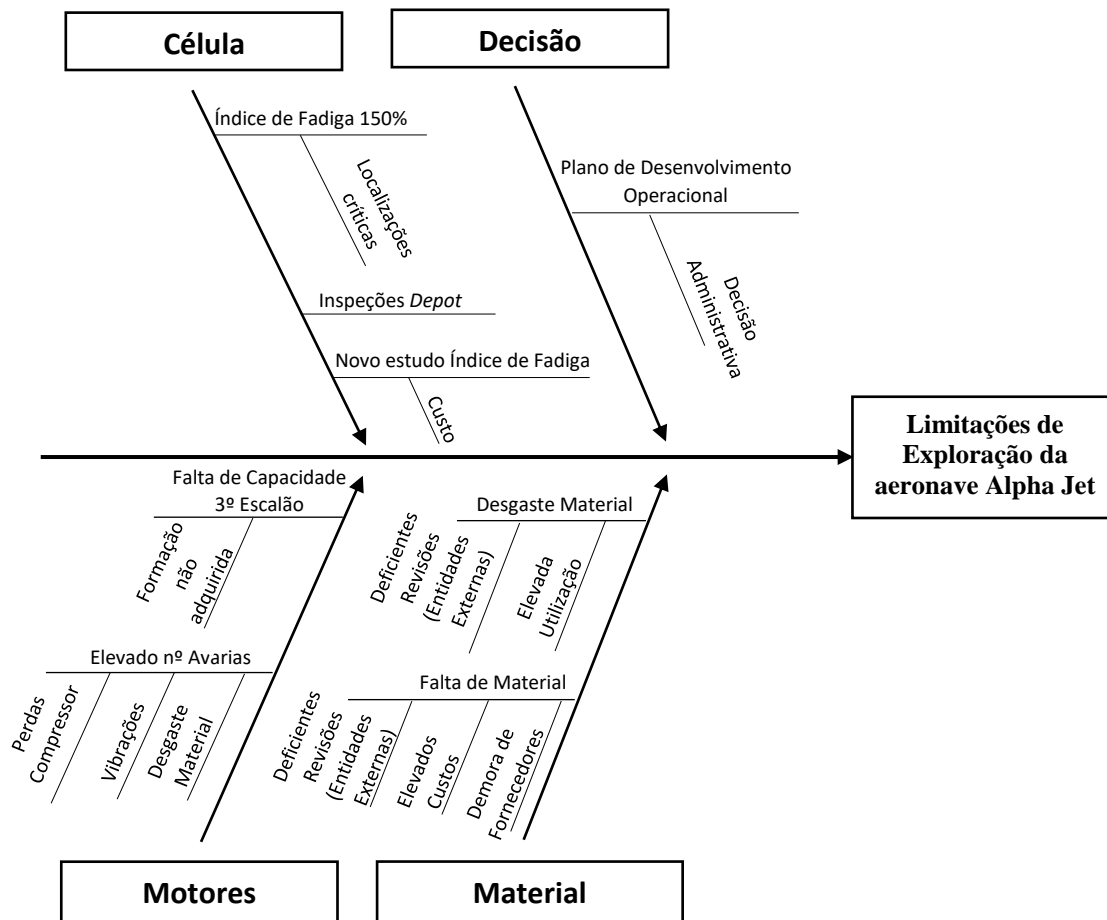


Figura 5. 7 –Diagrama Causa-Efeito aplicado ao Caso de Estudo

### Decisão

O plano operacional específico desenvolvido, pela Força Aérea Portuguesa, para a sustentabilidade da frota Alpha Jet, refere que a esta deverá ser explorada até janeiro de 2018, assumindo que depois desse marco, a frota deixará de operar, estando neste momento em período de Phase-Out. No entanto, até ao momento, nenhuma solução foi definida, sabendo que poderá ainda voar 237 HV, sem que nenhuma IPP seja realizada às células das aeronaves.

### Material

A falta de material, é um fator que se tem vindo a fazer sentir, nomeadamente material de consumo, originando, por vezes, maiores tempos de imobilização das aeronaves e consequentemente atrasos no curso de pilotagem. Esta falta de material deve-se,

maioritariamente, à grande demora de entrega por parte dos fornecedores, mas também ao elevado preço que estes impõem à Força Aérea Portuguesa. Tudo isto acresce as revisões, por vezes, algo deficientes por parte de organizações externas subcontratadas, levando também ao aumento dos tempos de imobilização para remoção e instalação dos componentes, mas também a um maior desgaste de componentes rotáveis pela sua elevada rotatividade de utilização nas aeronaves.

### Célula

No período compreendido entre 1975 e 1978, a IABG e a Dornier identificaram duas localizações críticas nas células das aeronaves, WS 54/55 e a FS27 BH30, que correspondem às furações das secções de encastramento das asas na fuselagem (Figura 5.8) e às zonas da fuselagem de encastramento das asas (Figura 5.9), respetivamente.



Figura 5. 8 - WS54/55: Furações das secções de encastramento das asas na fuselagem

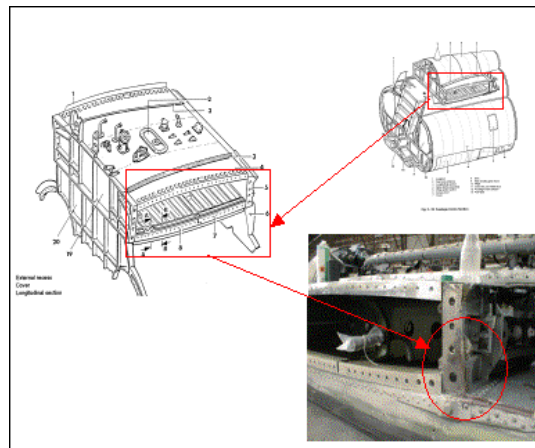


Figura 5. 9 - FS27 BH30: Zona da fuselagem de encastramento da asa

De acordo com estas duas localizações críticas foi, então, definido um teto de operação segura de 5000 HV por cada célula, devido à natureza da missão de instrução, permitindo assim um IF de 100%. A monitorização individual do IF de cada aeronave é feita através, não só do consumo de HV, mas também pelos contadores de Forças G, instalados nas aeronaves, que permitem avaliar o esforço a que está sujeita cada aeronave.

Em 2010, a Força Aérea Portuguesa, com a chegada de grande parte das células a um IF de 100%, encomendou um estudo de extensão de vida de fadiga à RUAG, permitindo assim estender a operação da frota até um IF de 150%. Neste estudo, foi definido um programa, chamado de SFIP, que consiste nas inspeções a 27 pontos críticos, as chamadas



SSI, as quais foram integradas nas IPP, sendo também monitorizado o cálculo do IF para as duas localizações críticas nas células das aeronaves, WS 54/55 e a FS27 BH30. Ou seja, este potencial de 237 HV não é fator limitativo para a continuidade da operacionalidade da Esquadra 103, pois ao serem efetuadas as respectivas IPP às células, é possível a regeneração deste potencial até um IF de 150%. A Figura 5.10 ilustra o potencial disponível por aeronave, segundo o controle das localizações críticas (WS 54/55 e a FS27 BH30), a partir do início de 2018:

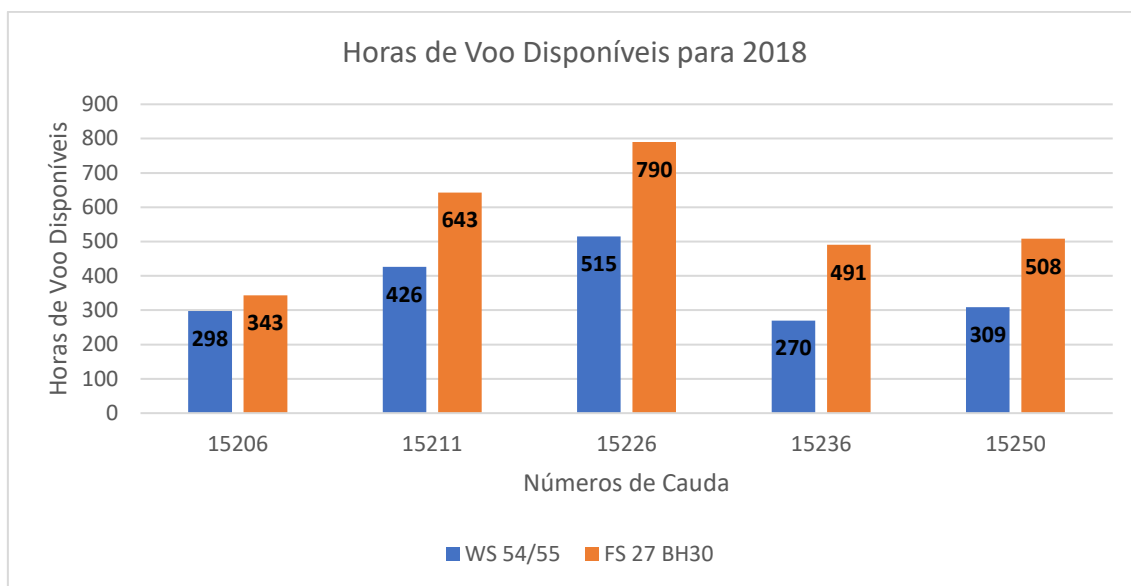


Figura 5. 10 - HV disponíveis por Aeronave (janeiro 2018) até IF 150%

É possível visualizar-se que, a localização WS 54/55 é a mais crítica, sendo essa a verdadeira limitadora em todas as células das aeronaves, totalizando um potencial disponível de 1818 HV distribuídas por 5 Aeronaves, até ao IF 150%. Conclui-se, portanto, que definindo um Regime de Esforço de 600 HV por ano, é possível estender a operação até ao segundo semestre de 2020. No entanto, o número de aeronaves disponíveis irá diminuir, pois com a renovação dos ciclos das inspeções *Depot*, neste caso por tempo de calendário, perder-se-ão duas aeronaves até dezembro de 2019, ficando as restantes três aeronaves com potencial disponível até ao segundo semestre de 2020. De frisar que, as aeronaves ficarão sem potencial disponível depois do segundo semestre de 2020, tanto a nível de Índice de Fadiga como das inspeções *Depot*. A Tabela 5.1 resume as necessidades de inspeções periódicas programadas desde o início de 2018 até ao limite de IF 150%:

Tabela 5. 1 - Número de IPP até ao IF 150%

Número de Cauda	Potencial (HV) Início 2018	IPP até IF 150%	Potencial (HV) até IF 150%
15206	100	2PE, HPO	298
15211	3	2PE, HPO	426
15226	18	2PE, HPO, 1PE	515
15236	85	2PE, HPO	270
15250	31	2PE, HPO	309

Observa-se, portanto, o número de inspeções a realizar para que o potencial de 1818 HV seja disponibilizado.

De referir, no entanto, apesar deste potencial poder estar disponível com a execução das respetivas IPP, resumidas na Tabela 5.1, verifica-se um grave problema a nível de motores, pois ou não há potencial disponível dos seus constituintes ou esses constituintes, que são ainda detentores de potencial, apresentam graves falhas na sua performance.

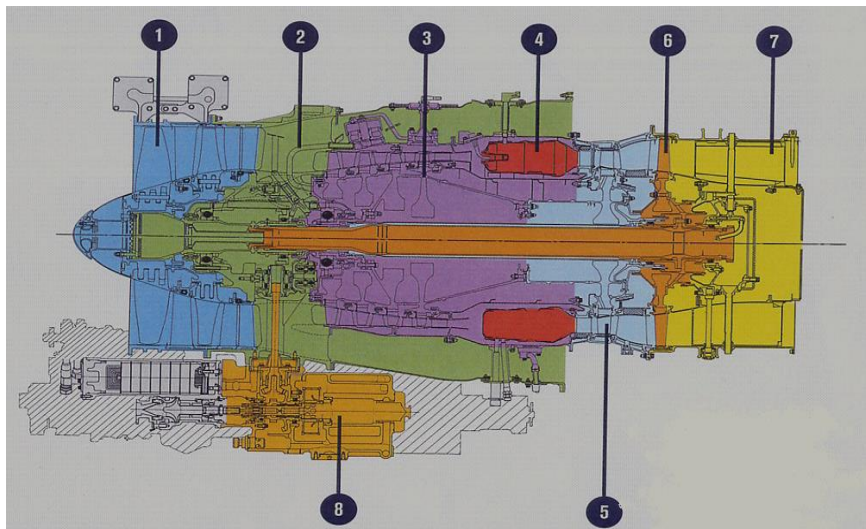
### Motores

A aeronave Alpha Jet é equipada com dois motores Larzac 04 C20, motor esse ilustrado na Figura 5.11, a versão mais potente dos motores Larzac, produção datada de 1982, pelos fabricantes Snecma e Turbomeca.



Figura 5. 11 - Vista frontal do Motor Larzac 04 C20

O motor Larzac 04 C20 é um motor *turbofan* de duplo veio, com uma estrutura modular, constituída por oito módulos, como se verifica na Figura 5.12. Cada módulo tem o seu próprio potencial, ou seja, diferentes ações de manutenção para os diferentes módulos. A intermutabilidade verifica-se tanto nos motores como nos respetivos módulos, mais propriamente, todos os motores podem ser instalados nas duas posições (esquerda e direita) de todas as aeronaves e qualquer módulo é instalável em qualquer motor.



- |                                        |                                                |
|----------------------------------------|------------------------------------------------|
| Módulo 1 – Compressor de Baixa Pressão | Módulo 5 – Turbina de Alta Pressão             |
| Módulo 2 – Cárter Intermédio (Difusor) | Módulo 6 – Turbina de Baixa Pressão            |
| Módulo 3 – Compressor de Alta Pressão  | Módulo 7 – Cárter da Turbina e Saída de Escape |
| Módulo 4 – Câmara de Combustão         | Módulo 8 – Caixa de Enrenagens                 |

Figura 5. 12 - Módulos constituintes do Motor Larzac 04 C20

A única capacidade de intervenção de 3º escalão, por parte desta área, é dedicada ao módulo 1, incidindo esta capacidade nas palhetas rotoras e estatoras, no que diz respeito à substituição de rotáveis, regeneração de potencial nas próprias palhetas, pintura e equilibragem.

Os módulos 3, 5 e 6, são aqueles pelos quais não existe capacidade de intervenção, apenas são realizadas instalações e remoções destes módulos, por completos, nos motores. No entanto, existem também a capacidade de rotação da posição dos módulos 5 e 6, ação que visa diminuir as vibrações localizadas nestes módulos.

Nesta área, as manutenções de 2º escalão consideradas, requerentes de remoção de motores da aeronave, são as HPO e EPE, sendo as restantes ações de manutenção de curta duração não requerentes de remoção de motores da aeronave.

De momento, existem 10 motores instalados por 5 aeronaves, sobrando 4 motores em manutenção programada e/ou não programada.

- ✓ Taxa de Avarias de Motores (Será considerada constante)

Em termos de avarias, nos últimos sete anos, é possível verificar-se na Figura 5.13 o número de avarias totais de todos os sistemas comparativamente com as avarias de motores:

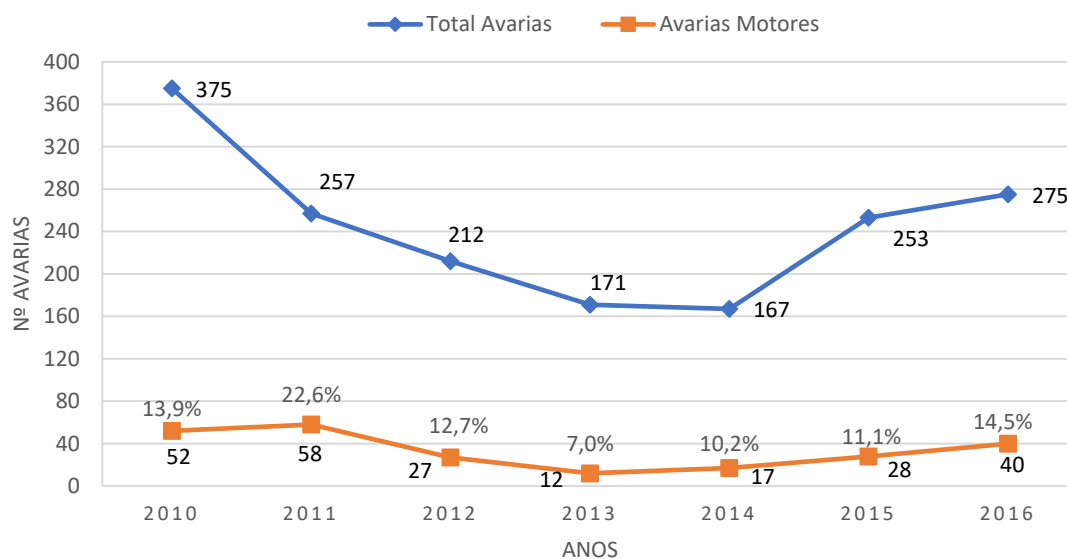


Figura 5. 13 - Quantitativo Avarias Anuais (2010 - 2016)

Analisando a Figura acima, os anos de 2010 e 2011, existe uma elevada taxa de avarias da área de motores justificada pela ausência de peças, nomeadamente material consumível, pois em 2009 é extinguido o contrato de manutenção com o fabricante destes motores. Entre 2012 e 2013 é adquirido o material consumível em falta, contribuindo para a diminuição da taxa de avarias, atingindo assim o ponto mais próximo do ideal de 7%

do número total avarias, mas também devido à utilização dos módulos possuidores de maior potencial e fiabilidade.

A partir de 2014, a taxa de avarias aumenta, e continua a aumentar até ao presente ano, muito devido à falta de potencial disponível de módulos, mas também à sua pouca fiabilidade resultante de graves falhas de performance, testadas em banco de ensaio. Pode, então, dizer-se que o período, correspondente da curva da banheira, ao qual a área de motores, neste momento, em termos de módulos, se encontra é ao período de desgaste/envelhecimento.

Será, então, necessário avaliar quais dos módulos, e constituintes, se encontram neste período, de modo a ser possível selecionar uma estratégia que permita o prolongamento da sua operacionalidade e, para esse efeito, serão avaliadas as avarias registadas segundo uma amostra.

Essa amostra compreenderá dois períodos.

Segundo a primeira amostra definida entre 01 de janeiro de 2010 e 31 de agosto de 2014, da qual foram realizadas 3778 HV, distribuídas por 8 aeronaves, sendo registadas 157 avarias de motores e apenas consideradas 133 avarias, excluindo 24 avarias não confirmadas. E a segunda a amostra definida entre 01 de janeiro de 2015 e 31 de dezembro de 2016, da qual foram realizadas 1365 HV, sendo registadas 68 avarias de motores e apenas consideradas 54 avarias, excluindo 14 avarias não confirmadas. A Tabela 5.2 referencia estes dois períodos de amostragem, dos quais são registadas o número de avarias por sistema e subsistema, taxa de avarias e percentagem do número de avarias em relação ao seu total.

O cálculo da taxa de avarias é executado através da divisão do número de avarias (estimado) pelo número total de HV nesse período, sendo esta taxa de avarias considerada constante. De referir que, os separadores de percentagem são meramente meios ilustrativos para facilitar a interpretação das taxas de avarias por parte do leitor.

Tabela 5. 2 - Avarias de Motores registadas em PLUS-MGM nos períodos de 01JAN2010 a 31AGO2014 e de 01JAN2015 a 31DEZ2016

Módulos / Sistema	Nomenclatura	2010 - 2014			2015 - 2016			Δ Percentagem (%)
		Nº Avarias	Taxa Avarias (Avarias/HV)	Percentagem	Nº Avarias	Taxa Avarias (Avarias/HV)	Percentagem	
M1	Compressor Baixa Pressão	3	0,000794	2	2	0,001465	3	1
	Estator do 1º Andar	2	0,000529	1	-	-	-	-1
	Palhetas Rotoras do 2º Andar	8	0,002118	5	1	0,000733	1	-4
	Palhetas Rotoras do 1º Andar	2	0,000529	1	-	-	-	-1
M2	Caixa do Rolamento Frontal	3	0,000794	2	6	0,004396	9	7
M3	Cablagens	-	-	-	3	0,002198	4	4
	Compressor Alta Pressão	4	0,001059	3	6	0,004396	9	6
	Injetor de Ignição	-	-	-	3	0,002198	4	4
M4	Câmara Combustão	8	0,002118	5	-	-	-	-5
M5	Turbina Alta Pressão	15	0,003970	10	3	0,002198	4	-5
M6	Turbina Baixa Pressão	-	-	-	3	0,002198	4	4
M7	Cárter da Turbina	13	0,003441	8	-	-	-	-8
	Sonda N1	2	0,000529	1	1	0,000733	1	0
	Rede Termopares Tt7	28	0,007411	18	8	0,005861	12	-6
	Tubeira de Escape	13	0,003441	8	-	-	-	-8
	Cone de Escape	15	0,003970	10	1	0,000733	1	-8
M8	Caixa Acessórios	3	0,000794	2	2	0,001465	3	1
	Sonda N2	2	0,000529	1	-	-	-	-1
	Bomba Principal de óleo	2	0,000529	1	3	0,002198	4	3
	Bomba de Óleo Hidráulico	-	-	-	2	0,001465	3	3
	Gerador Taquímetro (RPM's Avião)	-	-	-	1	0,000733	1	1
	Bomba de Combustível Baixa Pressão	3	0,000794	2	4	0,002930	6	4
	Controlo de Combustível	7	0,001853	4	5	0,003663	7	3

Com a análise da Tabela 5.2 é possível verificar que, no primeiro período, os valores obtidos entre o número de avarias pelo número total de 3778 HV (taxa avarias 2010 - 2014), verifica-se que os sistemas mais comprometedores de operação são as redes termopar (Tt7), as turbinas de alta pressão (Módulos 5) e os cones de escape.

No segundo período, com 1365 HV, é possível verificar que há um agravamento da disponibilidade de certos módulos/sistemas, muito derivado ao desgaste progressivo destes bens, correspondente ao período de degradação. Conclui-se, portanto, que os sistemas/módulos mais gravosos, que sofreram uma variação da taxa de avarias mais acentuada, são os compressores de alta pressão (Módulos 3) e as caixas de rolamento frontal.

No entanto, um maior número de avarias de um módulo não é sinónimo de mais gravoso, em termos de falha.

## **I.2. Delimitação do objeto de estudo.**

Dos quatro critérios apresentados assume-se que, para estudar a viabilidade da continuidade de operação da frota, o critério da Decisão terá de ser considerado como nulo ou que a decisão será de continuar a operação para além de janeiro de 2018.

O critério material não é considerado como a maior limitação, mas apenas um dos efeitos de uma frota em Phase-Out.

Em termos de células, é possível perfazer mais 1818 HV até atingir o IF 150%, assumindo que serão realizadas as IPPs necessárias.

De acordo com a análise dos sistemas mais críticos da frota Alpha Jet, conclui-se que os motores são o sistema que mais compromete a operacionalidade da frota, no entanto, como um maior número de avarias não é sinónimo de mais gravoso, através da seguinte análise FMEA vão ser analisados os modos de falha para os módulos / sistemas correspondentes.

O objeto de estudo, o qual será analisado quando aos sistemas mais críticos, serão os motores do Alpha Jet, pois é possível atingir o IF 150% com as células existentes, um total de 1818 HV.

### I.3. Definição de objetivos.

Tendo em conta os sistemas críticos do objeto de estudo, o modelo proposto visa a avaliação de alternativas (estratégias) que possibilitem a criação de valor à frota Alpha Jet, em termos de planeamento de manutenção, em caso de prolongamento de operacionalidade ou não, tendo em conta os custos associados e a carga de manutenção a ser executada.

## II. Análise de Risco

### II.1. Análise FMEA

#### Tabelas FMEA

No âmbito do caso de estudo, houve necessidade de adaptar as escalas do índice severidade, ocorrência e detetabilidade, pois as escalas genéricas não são as mais adequadas para o caso em concreto.

Tendo como base as Tabelas genéricas de Xu *et al.* (2002), Chin *et al.* (2009) e Chang (2009), foram definidas as seguintes Tabelas:

Tabela 5.3 - Índice de Severidade aplicada ao Caso de Estudo

Efeito	Tipo de Escalão de Manutenção	Tempo de Imobilização para Ação Corretiva (Horas)	Índice de Severidade
Extremamente Severo	3º Escalão	> 35	10
Altamente Severo	2º Escalão	27 a 35	9
Muito Severo	2º Escalão	22 a 27	8
Severo	2º Escalão	18 a 22	7
Significante	2º Escalão	14 a 18	6
Moderado	2º Escalão	10 a 14	5
Menor	2º Escalão	6 a 10	4
Fraco	2º Escalão	4 a 6	3
Muito fraco	2º Escalão	1 a 4	2
Nenhum	1º Escalão	0 a 1	1

No caso da aeronáutica, a severidade na eventual ocorrência de um modo de falha de qualquer bem é sempre máxima, pois irá comprometer a operação, a segurança dos recursos humanos, materiais e ambientais (caso se aplique este último). Por isso, a escala adaptada, Tabela 5.3, foi de encontro ao nível, à profundidade, de manutenção e consequente tempo, em horas, para execução das ações de manutenção necessárias em



caso de falha de qualquer bem, sendo o nível de maior profundidade e consequente maior tempo de imobilização o mais severo da escala do Índice de Severidade com valores entre os 0 – 10.

A Tabela do índice de ocorrência, Tabela 5.4, baseia-se nas taxas de avarias, Tabela 5.2, dos dois períodos de amostragem.

Tabela 5. 4 - Índice de Ocorrência aplicada ao Caso de Estudo

Probabilidade de Falha	Taxa Avarias (Avarias/HV)	Índice de Ocorrência
Extremamente provável	> 0,009	10
Muito alta	> 0,007 a 0,009	9
Alta	> 0,0054 a 0,007	8
Moderadamente alta	> 0,004 a 0,0054	7
Ligeiramente alta	> 0,0028 a 0,004	6
Moderada	> 0,0018 a 0,0028	5
Baixa	> 0,001 a 0,0018	4
Muito baixa	> 0,0005 a 0,001	3
Remotamente provável	> 0,0002 a 0,0005	2
Extremamente improvável	0 a 0,0002	1

Por fim, a Tabela 5.5 do índice de detecção é baseada nos tempos de imobilização, em horas, das aeronaves para serem efetuadas as ações de detecção de um eventual modo de falha.

Tabela 5. 5 - Índice de Detecção aplicada ao Caso de Estudo

Probabilidade de Detecção	Tempo de Imobilização para Detecção (Horas)	Índice de Detecção
Extremamente improvável	> 16	10
Muito remota	12 a 16	9
Remota	10 a 12	8
Muito baixa	8 a 10	7
Baixa	6 a 8	6
Moderada	4 a 6	5
Moderadamente alta	3 a 4	4
Alta	2 a 3	3
Muito alta	1 a 2	2
Extremamente provável	0 a 1	1

No entanto, salienta-se o facto de nem todos os modos de falha têm a mesma criticidade nem a mesma urgência em serem minimizados ou mitigados, com o intuito de diminuir o risco associado a cada modo de falha. Por isso, são definidas três gamas de valores (Tabela 5.6) pelas quais a análise FMEA se irá guiar, em termos de modos de falha a serem priorizados, sendo assim categorizados os RPNs resultantes da análise FMEA:

Tabela 5. 6 - Classificação RPN aplicada ao Caso de Estudo

Classificação Número Prioridade de Risco (RPN)		Urgência de Ações Corretivas
Alto Risco	$RPN \geq 200$	Ação de carácter imediata e urgente
Risco Moderado	$120 \leq RPN < 200$	Ação de carácter adiável e não urgente
Baixo Risco	$1 \leq RPN < 120$	Ação de carácter não urgente

As categorias de classificação RPN foram obtidas através da gama de valores obtidos pela análise FMEA, mas também tendo em conta os sistemas críticos já identificados na Tabela 5.2 e o nível de profundidade de manutenção a ser aplicada.

#### Aplicação FMEA ao Caso de Estudo

De seguida será implementada a análise FMEA ao motor Larzac 04 C20, que equipa as aeronaves Alpha Jet da Força Aérea Portuguesa.

A análise FMEA englobará os dois períodos de amostragem, de modo a verificar-se e estimar-se o aumento do risco que se tem vindo a verificar ao longo destes sete anos de operação.

A análise será efetuada por módulo, sendo decomposta em subsistemas e componentes. De referir que, o registo de ações de manutenção nem sempre é executado da maneira mais correta, em termos de atribuição de avarias a certos componentes, por isso o índice de ocorrência de cada modo de falha será estimado de acordo com as taxas de avarias, expressas na Tabela 5.2, mas também com a experiência do investigador em contexto real de operação.

Tabela 5. 7 - FMEA Módulo 1

Sistema: Módulo 1 - Compressor de Baixa Pressão														
Subsistema	Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potencial(is) de Falha	Gravidade 10-14	Gravidade 15-16	Causa(s) Potencial(is) de Falha	Ocorrência 10-14	Ocorrência 15-16	Medidas de Controle	Deteção 10-14	Deteção 15-16	RPN 10-14	RPN 15-16
					10	10		3	1		6	6	180	60
Conjunto Rotor-Estator de Dois Andares	Palhetas estadoras do 1º andar	Aspirar ar, comprimi-lo e fornecer, uma parte para o compressor de alta pressão e outra para a conduta de arrefecimento do motor (conduta de ar secundário)	Desgaste das palhetas estator do 1º andar	Diminuição do trabalho resultado do motor (impulso)	10	10	Erosão devido aos agentes atmosféricos e FOD	3	1	Inspeção Periódica de Ensaios Não Destrutivos (Eddy Current)	6	6	180	60
	Palhetas rotoras do 1º andar		Desgaste das palhetas rotoras do 1º andar	Diminuição do trabalho resultado do motor (impulso)	10	10	Erosão devido aos agentes atmosféricos e FOD	3	1	Inspeção Periódica de Ensaios Não Destrutivos (Eddy Current)	6	6	180	60
	Palhetas rotoras-estadoras do 2º andar		Desgaste das palhetas estadoras do 2º andar	Diminuição do trabalho resultado do motor (impulso)	10	10	Erosão devido aos agentes atmosféricos e FOD	1	1	Inspeção Visual	6	6	60	60
Carter do Compressor de Baixa Pressão	Alojar as palhetas estadoras de 1º andar	Desgaste no interior do cárter (zona de rotação das palhetas rotoras de 1º andar)	Danos no módulo em si ou em vários componentes	6	6	Danos por objetos estranhos (FOD)	3	4	Inspeção Visual	6	6	108	144	
Anel Intermediário	Fixação dos dois conjuntos de palhetas estadoras (1º e 2º Andar)	Deficiência do anel	Danos no módulo em si ou em vários componentes	6	6	Desgaste no interior do Anel Intermediário (zona de rotação das palhetas rotoras de 2º andar)	1	1	Inspeção Visual	6	6	36	36	

Tabela 5. 8 - FMEA Módulo 2

Sistema: Módulo 2 – Cárter Intermédio (Difusor)														
Subsistema	Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potencial(is) de Falha	Gravidade 10-14	Gravidade 15-16	Causa(s) Potencial(is) de Falha	Ocorrência 10-14	Ocorrência 15-16	Medidas de Controlo	Deteção 10-14	Deteção 15-16	RPN 10-14	RPN 15-16
					6	6		2	4		9	9	108	216
Cárter Intermédio	Caixa de Rolamentos Frontal	Fornecer movimento à caixa de engrenagens (Módulo 8)	Desgaste de O-ring	Fuga de óleo de lubrificação	6	6	Desgaste por funcionamento	2	4	Inspeção Visual	9	9	108	216
			Aparecimento de partículas ferrosas no óleo	Vibrações anormais	6	6	Desgaste da pista interior do rolamento Nº 2	3	4	Inspeção à percentagem de Partículas Magnéticas (12,5h)	2	2	36	48
			Separação do anel envolvente do Seal Labirinto	Perda de estanquicidade	6	6	Desgaste por funcionamento	1	1	Inspeção Visual	7	7	42	42
			Deterioração de Pintura / Corrosão	Degradação prematura da caixa de rolamentos frontal	8	8	Exposição a agentes atmosféricos	1	1	Inspeção Visual	6	6	48	48
Bypass Casing	Permite a continuidade do escoamento do ar secundário e fixação de outros componentes exteriores ao motor (ex: alojamento de condutas de ar/óleo/combustível)	Fissuras nos orifícios de fixação das condutas	Perda de eficiência do fluxo de arrefecimento	8	8	Vibração normal de funcionamento	1	1	Inspeção Visual	1	1	8	8	
		Mau estado geral das porcas interiores de fixação de componentes	Deficiência na fixação dos componentes que envolvem o exterior do Bypass Casing	2	2	Vibração normal de funcionamento	1	1	Inspeção Visual	2	2	4	4	

Tabela 5. 9 - FMEA Módulo 3

Sistema: Módulo 3 – Compressor de Alta Pressão														
Subsistema	Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potencial(is) de Falha	Gravidade 10-14	Gravidade 15-16	Causa(s) Potencial(is) de Falha	Ocorrência 10-14	Ocorrência 15-16	Medidas de Controle	Deteção 10-14	Deteção 15-16	RPN 10-14	RPN 15-16
					9	9		1	2		1	1	9	18
Cárter do Compressor de Alta Pressão	2 Bleed Valves	Controlar a riqueza da mistura ar-combustível em baixos regimes (válvula de descompressão de ar)	Prisão na haste do êmbolo	Diminuição de eficácia do motor	9	9	Degradação do material por sujidade	1	2	Sistema de aviso da aeronave em operação	1	1	9	18
	Válvula de Descarga	Permite a descarga de ar do compressor até aos 80%, evitando o excesso de consumo de combustível em baixos regimes	Falha elétrica (deixa de funcionar)	Diminuição de eficácia do motor	3	3	Sujeito à ação das condições adversas de operação (atmosféricas e de funcionamento)	1	2	Teste de simulação ao computador do motor	2	2	6	12
Conjunto Rotor-Estator de Quatro Andares		Comprimir a massa de ar vinda do compressor de baixa pressão, aquecê-la e enviá-la para a câmara de combustão	Insuficiência de pressão vinda do compressor	Insuficiência de impulso (pressão desenvolvida pelo motor)	10	10	Desgaste do conjunto rotor-estator	4	7	Leitura da pressão disponibilizada pelo compressor (em Banco de Ensaio)	6	7	240	490
			Insuficiência de Rotação do Compressor				Prisão no veio de Baixa Pressão	4	7	Teste funcional ao veio de Baixa Pressão (Contagem do tempo de paragem de rotação do veio)	2	2	80	140

**Sistema: Módulo 3 – Compressor de Alta Pressão (Continuação)**

Subsistema	Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potencial(is) de Falha	Gravidade 10-14	Gravidade 15-16	Causa(s) Potencial(is) de Falha	Ocorrência 10-14	Ocorrência 15-16	Medidas de Controlo	Deteção 10-14	Deteção 15-16	RPN 10-14	RPN 15-16
					4	4		3	4		6	6	72	96
Câmara de Combustão Exterior	Válvula de Limpeza	Permite fornecimento de combustível aos injetores de ignição e arranque, e evita a carbonização nos mesmos injetores através da ventilação	Funcionamento deficiente da válvula	Carbonização dos injetores	4	4	Desgaste dos componentes da válvula	3	4	Inspeção Visual aos Injetores de Ignição e Arranque	6	6	72	96
	2 Injetores de Ignição	Fornecer combustível necessário para que se estabeleça a ignição	Deficiente dispersão de combustível	Dificuldade ou insucesso no arranque	1	1	Sujidade acumulada no dispersor do injetor (carbonizado)	1	5	Teste em bancada	2	2	2	10
	2 Velas de Ignição	Provocar inflamação da mistura ar-combustível, através de um arco voltaico	Defeito no funcionamento	Dificuldade no arranque	4	4	Cablagem elétrica defeituosa	1	5	Teste funcional em bancada	2	2	8	40
			Ausência de Fálscas	Insucesso no arranque	2	2	Defeito da própria vela	3	3	Teste funcional em bancada	1	1	6	6
	3 Injetores de Arranque	Sustentar a evolução da ignição de forma homogénea	Deficiente dispersão de combustível	Dificuldade ou insucesso no arranque	4	4	Sujidade acumulada no dispersor do injetor (carbonizado)	2	4	Teste em bancada	6	6	48	96
	10 Injetores Duplos Principais	Injeção de combustível em alta pressão na câmara de combustão	Obstrução dos Injetores	Menor eficácia no desempenho do motor	9	9	Sujidade acumulada no dispersor do injetor (carbonizado)	1	1	Teste funcional em bancada	9	9	81	81
	Válvula de Ventilação	Purga combustível em excesso e evita detonações no arranque e autoignições no corte do motor	Deficiência de funcionamento da válvula	Detonações no arranque e Autoignições no corte do motor	3	3	Fadiga na lâmina de fecho da válvula	2	3	Inspeção Visual	1	1	6	9

Tabela 5. 10 - FMEA Módulo 4

Sistema: Módulo 4 – Câmara de Combustão														
Subsistema	Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potencial(is) de Falha	Gravidade 10-14	Gravidade 15-16	Causa(s) Potencial(is) de Falha	Ocorrência 10-14	Ocorrência 15-16	Medidas de Controle	Deteção 10-14	Deteção 15-16	RPN 10-14	RPN 15-16
Câmara de Combustão		Desenvolver energia potencial resultante da combustão da mistura ar-combustível, disponibilizando-a às turbinas de alta e baixa pressão	Fissuras	Instabilidade na combustão desenvolvida	7	7	Frequência recorrente à exposição de vibrações	1	2	Inspeção Visual ou Boroscópica	2	2	14	28
			Fissuras nos cordões de soldadura	Insuficiência da energia potencial desenvolvida	6	6	Cordões de soldadura com menor qualidade	1	2				12	24
			Elevadas temperaturas desenvolvidas no interior da câmara de combustão	Insuficiência da energia potencial desenvolvida	6	6	Degradação de material	5	1				60	12

Tabela 5. 11 - FMEA Módulo 5

Sistema: Módulo 5 – Turbina de Alta Pressão														
Subsistema	Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potencial(is) de Falha	Gravidade 10-14	Gravidade 15-16	Causa(s) Potencial(is) de Falha	Ocorrência 10-14	Ocorrência 15-16	Medidas de Controle	Deteção 10-14	Deteção 15-16	RPN 10-14	RPN 15-16
					6	6		2	1		10	10	120	60
Cárter da Turbina de Alta Pressão	Segmentos Cerâmicos	Suportar a Pressão e Temperatura desenvolvida na zona de rotação da turbina	Desgaste dos segmentos cerâmicos	Ressonância no motor	6	6	Desagregação do material	2	1	Inspeção Visual	10	10	120	60
Conjunto Estator de Alta Pressão de um Andar	Palhetas Estatoras de Alta Pressão do 1º Andar	Direcionar o fluxo da massa de ar quente proveniente da câmara de combustão	Desgaste das palhetas	Perturbação no escoamento da massa de ar quente (Menor eficiência no desempenho do módulo)	10	10	Exposição continuada a elevadas temperaturas	5	4	Inspeção Visual e/ou Boroscópica	5	5	250	200
Conjunto Rotor com um Andar	Palhetas Rotoras do 1º Andar	Transformar a energia cinética da massa de ar quente proveniente da câmara de combustão em energia mecânica para movimentar o compressor de alta pressão	Desgaste das palhetas	Falta de impulso do motor	10	10	Aproveitamento deficiente da massa de ar quente, resultando numa menor aceleração da massa de ar (Menor eficiência no desempenho do módulo)	6	5	Teste de operação em banco de ensaios	6	7	360	350
Conjunto Estator de Baixa Pressão com um Andar	Palhetas Estatoras de Baixa Pressão do 1º Andar	Direcionar a restante massa de ar quente proveniente da turbina de alta pressão para incidir nas palhetas da turbina de baixa pressão, movimentando-a	Fraturas nas palhetas	Perturbação no escoamento da massa de ar quente (Menor eficiência no desempenho do módulo)	10	10	Exposição continuada a elevadas temperaturas	6	2	Inspeção Visual e/ou Boroscópica	5	5	300	100
			Vibrações normais de funcionamento do motor		8	8	Fadiga do material	3	5	Teste de operação em banco	6	7	144	280



Tabela 5. 12 - FMEA Módulo 6

Sistema: Módulo 6 – Turbina de Baixa Pressão														
Subsistema	Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potencial(is) de Falha	Gravidade 10-14	Gravidade 15-16	Causa(s) Potencial(is) de Falha	Ocorrência 10-14	Ocorrência 15-16	Medidas de Controlo	Deteção 10-14	Deteção 15-16	RPN 10-14	RPN 15-16
					10	10		1	2		5	6	50	120
Rotor com um andar	Palhetas rotoras	Transformar a energia cinética da massa de ar restante da turbina de alta pressão em energia mecânica	Desgaste das palhetas	Limitação na produção de impulso do motor	10	10	Exposição continuada a elevadas temperaturas	1	2	Teste de operação em banco	5	6	50	120
			Vibrações no motor		6	6	Fadiga do material	2	4		6	7	72	168

Tabela 5. 13 - FMEA Módulo 7

Sistema: Módulo 7 – Cárter da Turbina e Saída de Escape														
Subsistema	Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potencial(is) de Falha	Gravidade 10-14	Gravidade 15-16	Causa(s) Potencial(is) de Falha	Ocorrência 10-14	Ocorrência 15-16	Medidas de Controle	Deteção 10-14	Deteção 15-16	RPN 10-14	RPN 15-16
					4	4		9	7		1	1	36	28
Cárter Exterior	Rede Termopar (Tt7)	Leitura da temperatura dos gases de escape	Fraturas na estrutura da rede termopar	Leitura incorreta da temperatura dos gases de escape do motor	4	4	Exposição permanente a temperaturas elevadas	9	7	Inspeção Visual e Teste funcional de operação	1	1	36	28
	Sonda N1	Transmite a leitura de RPM's do veio de baixa pressão	Leitura de RPM's inexistente ou com falhas para o computador do motor	Provoca má gestão de operação do motor pelo computador do motor	3	3	Fadiga material	3	2	Teste funcional de continuidade	1	1	9	6
	Apoio traseiro do motor	Apoio do motor à fuselagem da aeronave	Desgaste dos casquilhos de fixação	Vibrações	3	3	Uso continuado	1	1	Ensaio funcional de vibrações	2	2	6	6
	Tubeira de Escape	Direcionar os gases de escape para o exterior	Fraturas no corpo	Vibrações	4	4	Exposição continuada a temperaturas e pressões elevadas	6	1	Inspeção Visual	1	1	24	4
Cárter Interior	Cone de escape	Direcionar os gases de escape para o exterior	Fraturas nos olhais de fixação	Vibrações	4	4	Exposição continuada a temperaturas e pressões elevadas	6	3	Inspeção Visual	1	1	24	12

Tabela 5. 14 - FMEA Módulo 8

Sistema: Módulo 8 – Caixa de Engrenagens														
Subsistema	Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potencial(is) de Falha	Gravidade 10-14	Gravidade 15-16	Causa(s) Potencial(is) de Falha	Ocorrência 10-14	Ocorrência 15-16	Medidas de Controlo	Deteção 10-14	Deteção 15-16	RPN 10-14	RPN 15-16
					6	6		1	1		9	9	54	54
Cárter de Engrenagens	Bomba Mecânica de Baixa Pressão Combustível	Fornecimento de combustível à bomba de Alta Pressão no Controlo de Combustível	Veio de movimento partido ou preso	Deficiente performance do motor no arranque ou durante o funcionamento	6	6	Fadiga do material	1	1	Inspeção visual e Teste de operação em banco	9	9	54	54
			Fuga de combustível	Deficiente performance do motor no arranque ou durante o funcionamento	6	6	Desgaste dos O'rings	3	4	Inspeção Visual	1	1	18	24
			Fuga de óleo	Perda de óleo	6	6	Desgaste dos O'rings	3	5	Inspeção Visual no conjunto de drenos	1	1	18	30
	Controlo de Combustível	Fornecer combustível aos injetores do motor	Instabilidade da combustão	Instabilidade no funcionamento do motor	6	6	Funcionamento deficiente do Controlo de Combustível	4	6	Teste de operação em banco	3	3	72	108

**Sistema: Módulo 8 – Caixa de Engrenagens (continuação)**

Subsistema	Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potencial(is) de Falha	Gravidade 10-14	Gravidade 15-16	Causa(s) Potencial(is) de Falha	Ocorrência 10-14	Ocorrência 15-16	Medidas de Controlo	Deteção 10-14	Deteção 15-16	RPN 10-14	RPN 15-16
Depósito de Óleo	Vedantes do bocal (O'ring e junta)	Garantir a estanquicidade de óleo contido no depósito	Fuga de óleo	Gripagem do motor	1	1	Desgaste de material vedante	2	2	Inspeção Visual	1	1	2	2
	Bomba Principal de Óleo (lubrificação motor)	Fornecer pressão de óleo para a lubrificação do motor	Baixa Pressão de Óleo	Gripagem do motor	7	7	Desgaste dos O'rings	3	5	Indicador de Baixa Pressão de Óleo (Aeronave)	1	1	21	35
	Gerador Taquímetro	Dar indicação de RPM's do motor ao piloto	Indicação de RPM's inexistente (Aeronave)	Desconhecimento do regime do funcionamento do motor	2	2	Falha elétrica	1	3	Teste em operação	1	1	2	6
			Indicação inconsistente de RPM's		1	1	Falha do instrumento	2	1	Teste em operação	1	1	2	1
	Bomba de Óleo Hidráulico	Fornecer pressão de óleo para os diversos sistemas da aeronave	Fuga de óleo pelo dreno	Perda de óleo	7	7	Desgaste dos O'rings	1	4	Inspeção Visual no conjunto de drenos	1	1	7	28

## Análise de Resultados FMEA

Através da análise FMEA, a Tabela 5.15 resume os resultados RPN de acordo com a classificação expressa na Tabela 5.6:

Tabela 5. 15 - Resumo FMEA classificação RPN's

Classificação Número Prioridade de Risco (RPN)		Total 2010 - 2014	Total 2015 - 2016
Alto Risco	$RPN \geq 200$	4	4
Risco Moderado	$120 \leq RPN < 200$	4	5
Baixo Risco	$1 \leq RPN < 120$	38	37

Pode, então, verificar-se que há ligeiro aumento, pouco significativo, nos modos de falha cujo risco à operacionalidade é moderado. Na Tabela 5.16, podem verificar-se estes modos de falha mais críticos, mas também aqueles cujos RPN não representam a real criticidade dos modos de falha.

Apesar dos únicos sistemas identificados como sendo os mais críticos serem os módulos 3 (Compressor de Alta Pressão) e 5 (Turbina de Alta Pressão), como anteriormente já tinham sido referidos, ocasionalmente o módulo 6 (Turbina de Baixa Pressão) é uma das origens de vibrações no motor. De frisar que, existe um severo aumento na criticidade nos módulos 3 e uma ligeira diminuição nos módulos 5, ainda que bastante crítico, no entanto, é possível retirar desta análise que, em grande parte, a insuficiência de potência e vibrações nos motores são originados nos módulos 3 e módulos 5, respetivamente.

É de concluir que a origem destes RPNs críticos é devida à falta de manutenção apropriada destes módulos, isto derivado à inexistência de capacidade de intervenção nestes rotáveis, possibilitando unicamente substituições dos mesmos que, conseqüentemente, têm vindo a degradá-los, a nível de desempenho, fiabilidade e a nível da fadiga do material.

Tabela 5. 16 - Ações recomendadas para os RPN mais críticos

Sistema	Subsistema	Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Gravidade 10-14	Gravidade 15-16	Ocorrência 10-14	Ocorrência 15-16	Deteção 10-14	Deteção 15-16	RPN 10-14	RPN 15-16	ΔRPN	Ação Recomendada
Módulo 3	Conjunto Rotor-Estator de Quatro Andares		Comprimir a massa de ar vinda do compressor de baixa pressão, aquecê-la e enviá-la para a câmara de combustão	Insuficiência de Pressão vinda do compressor	10	10	4	7	6	7	240	490	250	Substituição do Módulo ou Revisão Geral
				Insuficiência de Rotação do Compressor	10	10	4	7	2	2	80	140	60	
Módulo 5	Conjunto Estator de Alta Pressão de um Andar	Palhetas Estadoras de Alta Pressão do 1º Andar	Direcionar o fluxo da massa de ar quente proveniente da câmara de combustão	Desgaste das palhetas	10	10	5	4	5	5	250	200	-50	Substituição das palhetas
	Conjunto Rotor com um Andar	Palhetas Rotoras do 1º Andar	Transformar a energia cinética da massa de ar quente proveniente da câmara de combustão em energia mecânica para movimentar o compressor de alta pressão	Desgaste das palhetas	10	10	6	5	6	7	360	350	-10	Substituição do Módulo ou Revisão Geral
	Conjunto Estator de Baixa Pressão com um Andar	Palhetas Estadoras de Baixa Pressão do 1º Andar	Direcionar a restante massa de ar quente proveniente da turbina de alta pressão para incidir nas palhetas da turbina de baixa pressão, movimentando-a	Fraturas nas palhetas	10	10	6	2	5	5	300	100	-200	Substituição das palhetas
				Vibrações normais de funcionamento do motor	8	8	3	5	6	7	144	280	106	Reposição do Módulo
Módulo 6	Rotor com um andar	Palhetas rotoras	Transformar a energia cinética da massa de ar restante da turbina de alta pressão em energia mecânica	Desgaste das palhetas	10	10	1	2	5	6	50	120	70	Substituição do Módulo ou Revisão Geral

Ao observar-se a Tabela 5.16 é possível verificar-se que a solução seria a substituição ou a revisão geral a estes três módulos, sendo que na manutenção da Esquadra 103 já não existem módulos 3 e 5 com potencial suficiente ou fiabilidade suficiente para poderem ser utilizados para minimizar estes modos de falha, para além dos módulos existentes que estão instalados em aeronaves operacionais, ou seja, a ação recomendada de substituição de módulos não é viável. Já no caso dos módulos 6, a solução de substituição ainda é viável, pois ainda existem alguns módulos com alguma fiabilidade e potencial para poder minimizar o crescente risco destes modos de falha.

A solução de revisão geral dos módulos 5 e 6 não é viável desde 2009, com o fim do contrato com o fabricante dos motores Larzac 04 C20, muito pelo diminuto orçamento anual atribuído ao Alpha Jet.

De acordo com o descrito acima, e a partir dos modos de falhas mais graves, é possível concluir que os rotáveis que mais comprometem a disponibilidade operacional da frota Alpha Jet são os módulos 3 (Compressor de Alta Pressão) e os módulos 5 (Turbina de Alta Pressão), pela falta de manutenção apropriada, em grande parte, devido a cortes orçamentais.

Sendo que, a próxima etapa do MSD - GECA tem como objetivo selecionar a estratégia de manutenção que permita criar valor à frota, isto é, terá de encontrar e avaliar outras alternativas que avaliem a possibilidade de extensão da operacionalidade da frota Alpha Jet ou que minimizem a degradação, e eventual perda, do património nacional, através de uma abordagem multicritério que permita a avaliação das variáveis obtidas na análise FMEA, ao nível organizacional operacional de manutenção, e de outras variáveis ou critérios que possibilitem estender a avaliação do Modelo de Suporte à Decisão na Gestão Estratégica da Condição de Ativos (MSD - GECA) até um nível organizacional estratégico de manutenção.

### **III. Estratégia de Resposta**

#### **III.1. Análise AHP**

Tendo já descoberto a origem do problema, os rotáveis que comprometem a continuidade de operacionalidade, módulos 3 e 5, pois apresentam os RPN's mais críticos, nesta próxima etapa será, então, necessário estudar os vários cenários e critérios que poderão influenciar a decisão final da estratégia de manutenção, com o objetivo de criação de

valor, tendo em conta os dados da análise FMEA e outros mais, para isso serão selecionados e ponderados critérios e alternativas que permitam a análise AHP atingir um nível organizacional estratégico de manutenção.

A análise AHP rege-se pelas seguintes etapas de aplicação (Cay e Uyan, 2013):

1. Construção da Matriz das Comparações Par a Par.

Construção da Hierarquia

A hierarquia definida, na Figura 5.14, tem como base na experiência do investigador do presente trabalho de investigação científica:

- Nível I: Definição do Objetivo Global (OG) do trabalho de Criação de Valor, avaliando a possibilidade de extensão da operacionalidade da frota;
- Nível II: Critérios que poderão influenciar os diferentes cenários de decisão;
- Nível III: Alternativas de decisão ou cenários.

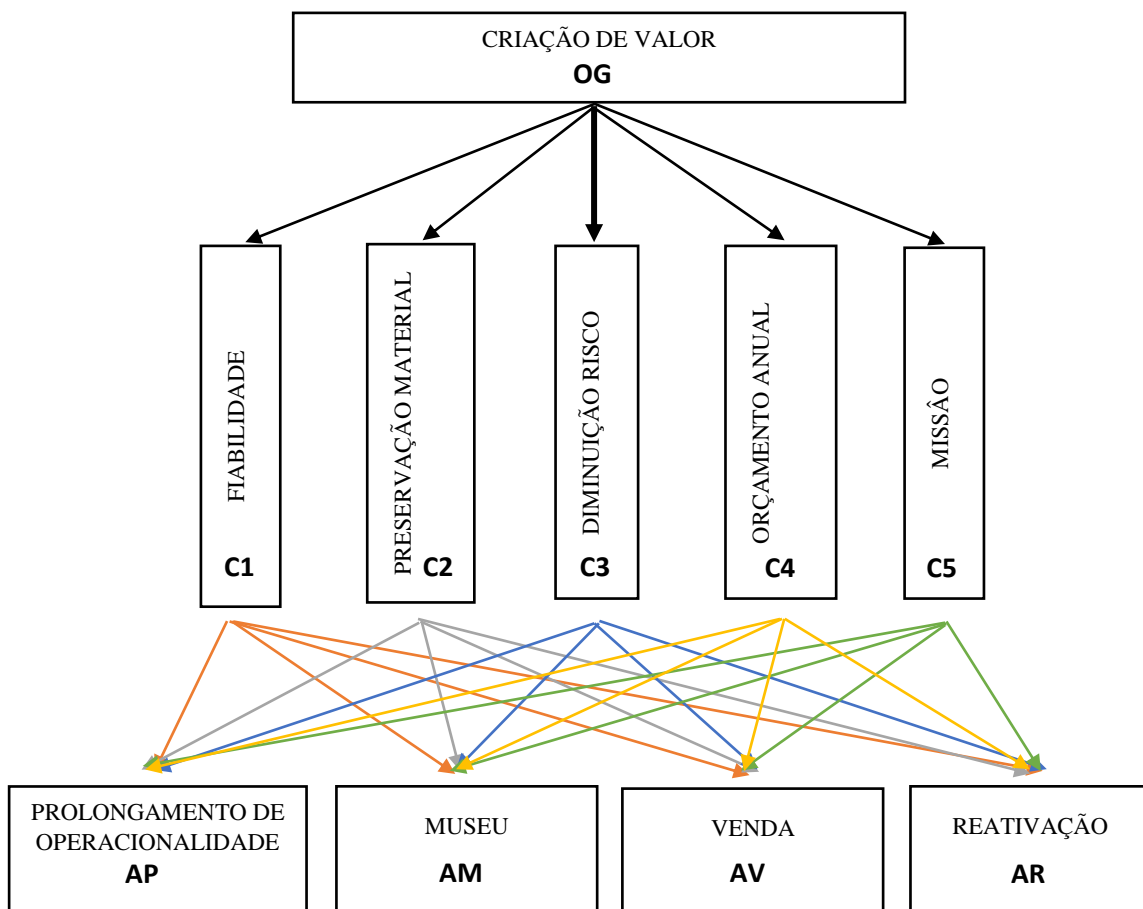


Figura 5. 14 - Estrutura Hierárquica de Decisão de avaliação da Extensão de Operacionalidade



#### Descrição de Critérios:

- **(C1):** Fiabilidade – Aptidão ou probabilidade de um bem cumprir a sua função requerida, sob determinadas condições e durante um intervalo de tempo, ou seja, o estado do material em Janeiro de 2018;
- **(C2):** Preservação Material – Ações de controlo de deterioração de bens e minimização/mitigação de danos físicos às aeronaves, durante o processo de transporte e armazenamento;
- **(C3):** Diminuição de Risco – Ações de manutenção subcontratadas, revisão dos módulos 3 e 5, para regenerar potencial, índices de fiabilidade e de segurança (custo associado);
- **(C4):** Orçamento Anual – Limitações orçamentais de manutenção;
- **(C5):** Missão – Tipologia de missão da frota, a de instrução, pode limitar a decisão de continuidade de operação da frota.

#### Descrição de Alternativas:

- **(AP):** Prolongamento de Operacionalidade – Requer a continuidade de operação da frota Alpha Jet, a partir de janeiro de 2018, até ao limite de vida das células das aeronaves, ao mínimo custo possível;
- Não Prolongamento de Operacionalidade – Paragem da frota Alpha Jet a partir de janeiro de 2018:
  - **(AM):** Museu – As aeronaves requerem um elevado estado de apresentação, sendo necessário, no entanto, ações de preservação para que a degradação dos constituintes das aeronaves seja minimizada ao máximo;
  - **(AV):** Venda – Com o propósito de gerar lucro, as aeronaves requerem ações de preservação dos seus constituintes, preservando-os ao máximo e respetiva fiabilidade;
  - **(AR):** Reativação – As aeronaves requerem ações de preservação dos seus constituintes, preservando-os ao máximo e respetiva fiabilidade, com o intuito de reduzir ao máximo a carga de manutenção no caso de reativação dos meios.

#### a. Comparações par a par.

Utilizando a escala de Saaty, os critérios são comparados, Tabela 5.17, aferindo a sua preferência, e representados na forma matricial:

Tabela 5. 17 - Comparações Par a Par do Caso de Estudo

<i>Critérios</i>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>
<b>C1</b>	1	1/7	1/3	1/6	1/2
<b>C2</b>	7	1	1/2	1/2	3
<b>C3</b>	3	2	1	1/2	6
<b>C4</b>	6	2	2	1	2
<b>C5</b>	2	1/3	1/6	1/2	1

## 2. Normalização de Matrizes.

Calcular o somatório dos elementos de cada coluna das matrizes e de seguida cada elemento será dividido pelo somatório da respetiva coluna:

Tabela 5. 18 - Somatório de Colunas

<i>Critérios</i>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>
<b>C1</b>	1	1/7	1/3	1/6	1/2
<b>C2</b>	7	1	1/2	1/2	3
<b>C3</b>	3	2	1	1/2	6
<b>C4</b>	6	2	2	1	2
<b>C5</b>	2	1/3	1/6	1/2	1
<b>SUM</b>	19,00	5,48	4,00	2,67	12,50

Tabela 5. 19 - Matriz Normalizada

<i>Critérios</i>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>
<b>C1</b>	0,053	0,026	0,083	0,063	0,040
<b>C2</b>	0,368	0,183	0,125	0,188	0,240
<b>C3</b>	0,158	0,365	0,250	0,188	0,480
<b>C4</b>	0,316	0,365	0,500	0,375	0,160
<b>C5</b>	0,105	0,061	0,042	0,188	0,080
<b>SUM</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

## 3. Cálculo do Vetor de Prioridade Principal ( $C_i$ ).

Aqui são calculadas as médias dos elementos que compõem as linhas das matrizes normalizadas, ou, o vetor de prioridade,  $C_i$ , de cada linha:

Tabela 5. 20 - Vetor de Prioridade Principal ( $C_i$ )

<i>Critérios</i>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>	<b>Média (<math>C_i</math>)</b>
<b>C1</b>	0,053	0,026	0,083	0,063	0,040	0,0529
<b>C2</b>	0,368	0,183	0,125	0,188	0,240	0,2207
<b>C3</b>	0,158	0,365	0,250	0,188	0,480	0,2881
<b>C4</b>	0,316	0,365	0,500	0,375	0,160	0,3432
<b>C5</b>	0,105	0,061	0,042	0,188	0,080	0,0951

De seguida, terá de se apresentar as comparações par a par de cada critério em relação às alternativas, seus vetores de prioridade principais (peso relativo de cada alternativa em relação a cada critério), e por fim, o cálculo de um único vetor para cada alternativa em relação ao Objetivo Global, sendo que, este cálculo é traduzido pela multiplicação dos vetores principais de cada alternativa em relação a cada critério pelo vetor de prioridade principal ( $C_i$ ).

Tabela 5. 21 - Comparações C1

<b>C1</b>	<b>AP</b>	<b>AM</b>	<b>AV</b>	<b>AR</b>	<b>Média (<math>c_i</math>)</b>
<b>AP</b>	1	9	2	2	0,4258
<b>AM</b>	1/9	1	1/9	1/9	0,0347
<b>AV</b>	1/2	9	1	1/3	0,2047
<b>AR</b>	1/2	9	3	1	0,3349
<b>SUM</b>	2,11	28,00	6,11	3,44	

Tabela 5. 22 - Comparações C2

<b>C2</b>	<b>AP</b>	<b>AM</b>	<b>AV</b>	<b>AR</b>	<b>Média (<math>c_i</math>)</b>
<b>AP</b>	1	1/9	1/9	1/9	0,0352
<b>AM</b>	9	1	1/2	1/2	0,2231
<b>AV</b>	9	2	1	1/2	0,3066
<b>AR</b>	9	2	2	1	0,4351
<b>SUM</b>	28,00	5,11	3,61	2,11	

Tabela 5. 23 - Comparações C3

<b>C3</b>	<b>AP</b>	<b>AM</b>	<b>AV</b>	<b>AR</b>	<b>Média (<math>c_i</math>)</b>
<b>AP</b>	1	8	3	2	0,4285
<b>AM</b>	1/8	1	1/9	1/9	0,0364
<b>AV</b>	1/3	9	1	1/6	0,1633
<b>AR</b>	1/2	9	6	1	0,3718
<b>SUM</b>	1,96	27,00	10,11	3,28	

Tabela 5. 24 - Comparações C4

C4	AP	AM	AV	AR	Média (c <sub>i</sub> )
AP	1	9	1/5	6	0,2635
AM	1/9	1	1/9	1/6	0,0365
AV	5	9	1	8	0,5951
AR	1/6	6	1/8	1	0,1049
SUM	6,28	25,00	1,44	15,17	

Tabela 5. 25 – Comparações C5

C5	AP	AM	AV	AR	Média (c <sub>i</sub> )
AP	1	3	3	1/2	0,3411
AM	1/3	1	1/4	1/8	0,0788
AV	1/3	4	1	1/2	0,1998
AR	1/2	8	2	1	0,3803
SUM	2,17	16,00	6,25	2,13	

Tabela 5. 26 - Vetor Único cada Alternativa em relação ao Objetivo Global

Vetores Prioridade cada Alternativa

Vetor Prioridade Principal

Critérios	C1	C2	C3	C4	C5
AP	0,4258	0,0352	0,4285	0,2635	0,3411
AM	0,0347	0,2231	0,0364	0,0365	0,0788
AV	0,2047	0,3066	0,1633	0,5951	0,1998
AR	0,3349	0,4351	0,3718	0,1049	0,3803

×

Critérios	Média (C <sub>i</sub> )
C1	0,0529
C2	0,2207
C3	0,2881
C4	0,3432
C5	0,0951

=

Alternativas	Vetor Único
AP	0,2766
AM	0,0816
AV	0,3488
AR	0,2930

Interpretando os resultados do Vetor Único, conclui-se que:

- A alternativa Prolongamento de Operacionalidade (AP) revela uma preferência de 27,66%;
- A alternativa Museu (AM) revela uma preferência de 8,16%;
- A alternativa Venda (AV) revela uma preferência de 34,88%;
- A alternativa Reativação (AR) revela uma preferência de 29,3%.

#### 4. Controlo da Consistência dos Vetores de Prioridade.

De modo a encontrar algum tipo de inconsistência no método AHP, será necessário calcular a consistência das comparações par a par efetuadas:

##### a. Cálculo do Vetor de Consistência ( $x_i$ ).

O vetor de consistência,  $x_i$ , é determinado a partir da multiplicação da matriz de comparações par a par com o vetor de prioridade principal,  $C_i$ :

Tabela 5. 27 - Vetor de Consistência

Comparações Par a Par de cada Critério						Vetor Prioridade Principal	
Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	Critérios	Média ( $c_i$ )
C1	1	1/7	1/3	1/6	1/2	C1	0,0529
C2	7	1	1/2	1/2	3	C2	0,2207
C3	3	2	1	1/2	6	C3	0,2881
C4	6	2	2	1	2	C4	0,3432
C5	2	1/3	1/6	1/2	1	C5	0,0951

×

Vetor Consistência ( $x_i$ )	
	0,2852
	1,1919
	1,6302
	1,8684
	0,4941

=

##### b. Cálculo do autovalor ( $\lambda_{max}$ ).

O cálculo do autovalor  $\lambda_{max}$  é efetuado através da média da divisão entre os vetores de consistência e de prioridade principal:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{c_i} = \frac{1}{5} \cdot \left( \frac{0,2852}{0,0529} + \frac{1,1919}{0,2207} + \frac{1,6302}{0,2881} + \frac{1,8684}{0,3432} + \frac{0,4941}{0,0951} \right) = 5,4181$$

c. Cálculo do Índice de Consistência (*CI*).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{5,4181 - 5}{5 - 1} = 0,1045$$

d. Cálculo da Razão de Consistência (*CR*).

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,1045}{1,12} = 0,0933 = 9,3\%$$

O Índice de Consistência Aleatória (*RI*) é obtido na Tabela 5.28, ordem de matriz  $n = 5$ .

Tabela 5. 28 - Valores do Índices de Consistência (Cay e Uyan, 2013)

Ordem da Matriz (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valores de RI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

A Razão de Consistência é menor que 10% ( $CR \leq 0,10$ ), ou seja, o grau de consistência é satisfatório.

### Análise de Resultados AHP

De referir que, a hierarquia de alternativas AHP será ilustrada de modo a dar mais alguma validade e consistência à hierarquia de alternativas, a serem calculadas pela ferramenta TOPSIS, no entanto, o AHP é utilizado para ponderar os critérios e o TOPSIS irá selecionar a alternativa mais ideal.

Na Figura 5.15 são representados os resultados da análise AHP, esta árvore de decisão ilustra o peso de cada combinação de critérios relacionados com cada alternativa:

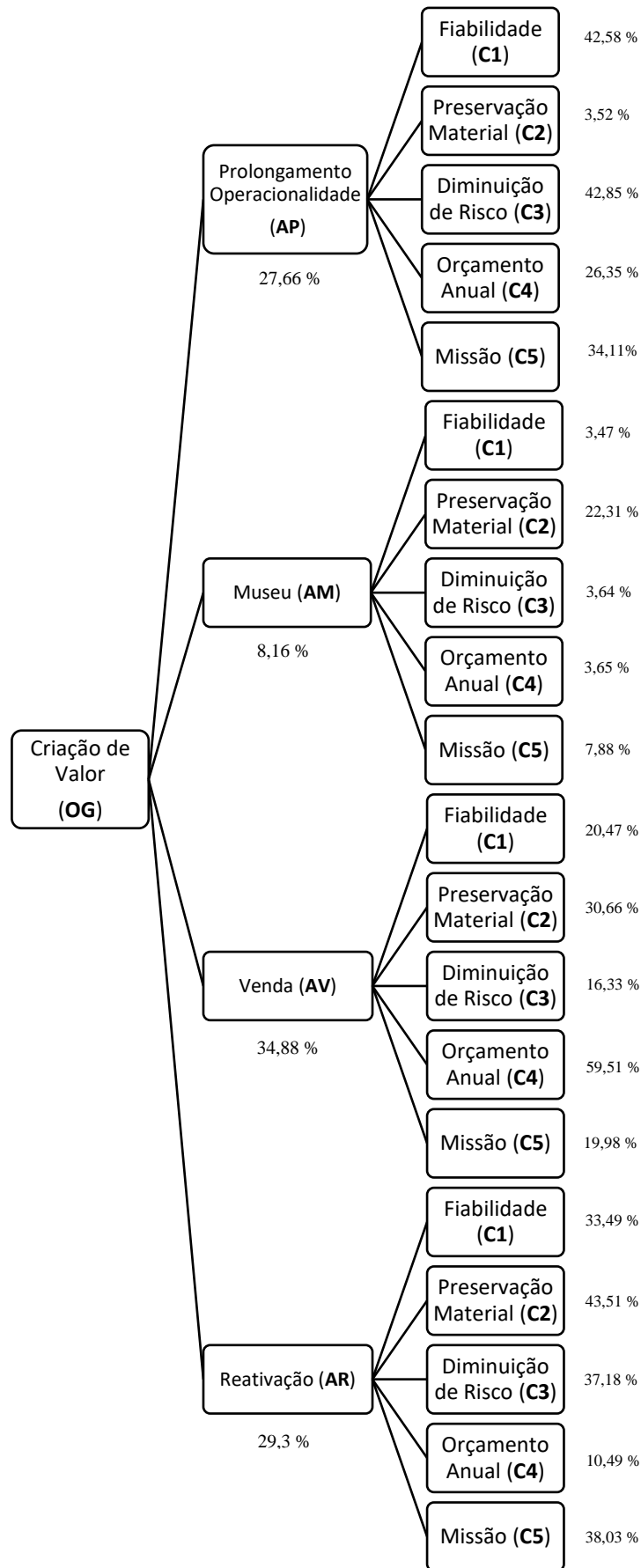


Figura 5. 15 - Árvore de decisão AHP

Tabela 5. 29 - Resumo AHP

<i>Alternativas</i>	<b>Ranking</b>	<b>Porcentagem</b>	<b>Critério Preferencial</b>
Prolongamento Operacional ( <b>AP</b> )	3	27,66%	Diminuição de Risco ( <b>C3</b> )
Museu ( <b>AM</b> )	4	8,16%	Preservação Material ( <b>C2</b> )
Venda ( <b>AV</b> )	1	34,88%	Orçamento Anual ( <b>C4</b> )
Reativação ( <b>AR</b> )	2	29,3%	Preservação Material ( <b>C2</b> )

Na Tabela 5.29 são hierarquizadas as alternativas, de acordo com a sua preferência, estando, também, os critérios preferenciais, ou seja, os que mais influenciam cada alternativa. Concluindo-se que a alternativa preferencial é a de Venda (AV), sendo favorecida pelo Orçamento Anual (C4), ficando para terceiro lugar o Prolongamento Operacional (AP), suportado pelo critério de Diminuição de Risco (C3). Através da análise AHP, hierarquicamente, retira-se que viabilizar a continuidade de operação da frota Alpha Jet, um dos grandes focos desta metodologia, não é das alternativas mais pretendidas. No entanto, Emovon, (2016) e Certa *et al.* (2013) referem que o AHP é definido como uma ferramenta de atribuição de valores a determinados critérios, enquanto a ferramenta TOPSIS encarrega-se de selecionar o plano de manutenção ou alternativa, por isso, o papel da próxima etapa da metodologia MSD - GECA é o de selecionar uma das alternativa, a mais ideal.

### III.2. Análise TOPSIS

Nesta etapa, será selecionada a alternativa mais próxima do ideal, de acordo com os critérios e alternativas definidos na etapa anterior, dentro das preferências estabelecidas.

#### 1. Construção da Matriz de Decisão $D^k$ .

Segundo Gurung e Phipon (2016), Sasi e Digalwar (2015) e Wan *et al.* (2014), terá de ser desenvolvida uma escala (Tabela 5.30) que avalie a relação de conformidade entre cada critério e cada alternativa, a escala terá a dimensão de 0 a 10, ficando ao critério do decisor a dimensão da escala.



Tabela 5. 30 - Escala de Atributos Criterial

Valores	Fiabilidade (C1)	Preservação Material (C2)	Diminuição Risco (C3)	Orçamento Anual (C4)	Missão (C5)
1	Inexistente	Desnecessária	Desnecessário	Não favorece	Desconsiderada
3	Baixa	Pouco necessária	Pouco necessário	Pouco Favorece	Pouco considerada
5	Moderada	Moderadamente	Moderadamente	Moderadamente	Moderadamente
7	Boa	Necessária	Necessário	Favorece	Considerada
9	Muito Boa	Muito necessária	Muito necessário	Favorece muito	Muito considerada

De acordo com a Tabela 5.30, de avaliação criterial, a Tabela 3.15, Matriz de Decisão  $D^k$ , exprime a avaliação de conformidade de cada critério em relação a cada alternativa.

Tabela 5. 31 - Elementos da Matriz de Decisão  $D^k$ 

Alternativas	Critérios				
	Fiabilidade (C1)	Preservação Material (C2)	Diminuição Risco (C3)	Orçamento Anual (C4)	Missão (C5)
Prolongamento Operacional (AP)	5	5	9	1	3
Museu (AM)	3	9	3	7	5
Venda (AV)	5	7	3	9	5
Reativação (AR)	5	9	5	5	5
Importância ( $w_j$ )	<b>0,0529</b>	<b>0,2207</b>	<b>0,2881</b>	<b>0,3432</b>	<b>0,0951</b>

Nota: O valor de  $w_j$ , em relação a cada critério, advém do vetor de prioridade ( $C_i$ ) dos critérios, do método AHP.

## 2. Construção da matriz de Decisão Normalizada $R^k$ .

A normalização dos elementos genéricos encontra-se sumarizada na Tabela 5.32, de seguida é exemplificado o cálculo da normalização linear:

$$Exemplo: r_{11} = \frac{5}{\sqrt{(5^2 + 3^2 + 5^2 + 5^2)}} = 0,5455 ; r_{33} = \frac{3}{\sqrt{(9^2 + 3^2 + 3^2 + 5^2)}} = 0,2694$$

Tabela 5. 32 - Matriz de Decisão Normalizada  $R^k$ 

Alternativas	Critérios				
	Fiabilidade (C1)	Preservação Material (C2)	Diminuição Risco (C3)	Orçamento Anual (C4)	Missão (C5)
Prolongamento Operacional (AP)	0,5455	0,3255	0,8082	0,0801	0,3273
Museu (AM)	0,3273	0,5859	0,2694	0,5604	0,5455
Venda (AV)	0,5455	0,4557	0,2694	0,7206	0,5455
Reativação (AR)	0,5455	0,5859	0,4490	0,4003	0,5455
Importância ( $w_j$ )	<b>0,0529</b>	<b>0,2207</b>	<b>0,2881</b>	<b>0,3432</b>	<b>0,0951</b>

### 3. Cálculo da matriz de decisão Ponderada-Normalizada $V^k$ .

O cálculo da matriz  $V^k$ , Tabela 5.33, obtém-se a partir da multiplicação dos elementos normalizados da matriz  $R^k$  com a correspondente importância,  $w_j$ , de critérios, obtidos na Tabela 5.32. De seguida, encontra-se exemplificado o cálculo correspondente:

$$\text{Exemplo: } V_{31} = 0,0529 \times 0,5455 = 0,0289 ; V_{23} = 0,2881 \times 0,2694 = 0,0776$$

Tabela 5. 33 - Matriz de Decisão Ponderada-Normalizada  $V^k$ 

Alternativas	Critérios				
	Fiabilidade (C1)	Preservação Material (C2)	Diminuição Risco (C3)	Orçamento Anual (C4)	Missão (C5)
Prolongamento Operacional (AP)	0,0289	0,0718	0,2329	0,0275	0,0311
Museu (AM)	0,0173	0,1293	0,0776	0,1923	0,0519
Venda (AV)	0,0289	0,1006	0,0776	0,2473	0,0519
Reativação (AR)	0,0289	0,1293	0,1294	0,1374	0,0519
<b>PIS (<math>v^+</math>)</b>	<b>0,0289</b>	<b>0,0718</b>	<b>0,0776</b>	<b>0,2473</b>	<b>0,0519</b>
<b>NIS (<math>v^-</math>)</b>	<b>0,0173</b>	<b>0,1293</b>	<b>0,2329</b>	<b>0,0275</b>	<b>0,0311</b>

### 4. Cálculo dos dois pontos cardiais PIS ( $v^+$ ) e NIS ( $v^-$ ).

Na Tabela 5.33 estão representados os PIS e NIS, os maiores valores criteriosais associados aos critérios de benefício ou menores valores criteriosais associados aos critérios negativos

e os menores valores criteriosais associados aos critérios de benefício ou maiores valores criteriosais associados aos critérios negativos, respetivamente.

*Nota:* sendo assim, os critérios C2 e C3 representam custos, ou seja, são considerados critérios negativos, aplicar-se-á, então nestes critérios, o PIS como o menor valor negativo e o NIS como o maior valor negativo.

5. Cálculo da distância Euclidiana entre alternativa  $i$  e o ponto PIS ( $D_i^+$ ) e o ponto NIS ( $D_i^-$ ).

*Exemplo:*  $D_{i\ AP}^+$

$$= \sqrt{(0,0289 - 0,0289)^2 + (0,0718 - 0,0718)^2 + (0,2329 - 0,0776)^2 + (0,0275 - 0,2473)^2 + (0,0311 - 0,0519)^2}$$

$$= \sqrt{0,0729} = 0,2699$$

Tabela 5. 34 - Pontos PIS na Matriz de Decisão Ponderada-Normalizada

Alternativas	Critérios					$\Sigma$	$D_i^+$
	Fiabilidade (C1)	Preservação Material (C2)	Diminuição Risco (C3)	Orçamento Anual (C4)	Missão (C5)		
Prolongamento Operacional (AP)	0	0	0,0241	0,0483	0,0004	0,0729	0,2699
Museu (AM)	0,0001	0,0033	0	0,0030	0	0,0065	0,0804
Venda (AV)	0	0,0008	0	0	0	0,0008	0,0288
Reativação (AR)	0	0,0033	0,0027	0,0121	0	0,0181	0,1344

*Exemplo:*  $D_{i\ AP}^-$

$$= \sqrt{(0,0289 - 0,0173)^2 + (0,0718 - 0,1293)^2 + (0,2329 - 0,2329)^2 + (0,0275 - 0,0275)^2 + (0,0311 - 0,0311)^2}$$

$$= \sqrt{0,0034} = 0,0586$$

Tabela 5. 35 - Pontos NIS na Matriz de Decisão Ponderada-Normalizada

Alternativas	Critérios					$\Sigma$	$D_i^-$
	Fiabilidade (C1)	Preservação Material (C2)	Diminuição Risco (C3)	Orçamento Anual (C4)	Missão (C5)		
Prolongamento Operacional (AP)	0,0001	0,0033	0	0	0	0,0034	0,0586
Museu (AM)	0	0	0,0241	0,0272	0,0004	0,0517	0,2274
Venda (AV)	0,0001	0,0008	0,0241	0,0483	0,0004	0,0738	0,2717
Reativação (AR)	0,0001	0	0,0107	0,0121	0,0004	0,0234	0,1528

6. Cálculo do coeficiente de aproximação,  $C_i^*$ .

A aproximação relativa de cada alternativa ao ponto PIS, é feita através do coeficiente de aproximação,  $C_i^*$ , cujas melhores soluções são aquelas que se aproximam do valor 1 de  $C_i^*$ .

$$\text{Exemplo: } C_{i\text{AV}}^* = \frac{D_i^-}{(D_i^+ + D_i^-)} = \frac{0,2717}{(0,0288 + 0,2717)} = 0,9043$$

Tabela 5. 36 - Coeficientes de Aproximação

Alternativas	$C_i^*$	Hierarquia
Prolongamento Operacional (AP)	0,1784	4
Museu (AM)	0,7389	2
Venda (AV)	0,9043	1
Reativação (AR)	0,5321	3

Conclui-se então, tendo em conta o estado atual da frota Alpha Jet e suas variáveis dependentes, a solução mais perto do ideal para a criação de valor à mesma, de entre as alternativas disponíveis, é a **Venda** da frota.

Tabela 5. 37 - Resultados AHP vs TOPSIS

Alternativas	AHP	TOPSIS
	Hierarquia	
Prolongamento Operacional (AP)	3	4
Museu (AM)	4	2
Venda (AV)	1	1
Reativação (AR)	2	3

Com a ajuda do AHP, atribuição de pesos relativos aos critérios, o TOPSIS conseguiu hierarquizar as alternativas propostas, através da avaliação de conformidade de cada critério em relação a cada alternativa. E de acordo com a hierarquia AHP, é possível traduzir-se alguma validade e consistência nos resultados do TOPSIS, pois a reforçou a

premissa da alternativa de Venda, ser a mais preferida, apesar das restantes alternativas terem alterado ligeiramente a sua preferência.

Conclui-se, portanto, a continuidade de operação da frota Alpha Jet não é viável, muito devido ao elevado custo das ações de manutenção necessárias para diminuição do risco atual, existente nos módulos 3 e 5 dos motores destas aeronaves, determinado pela FMEA. Então, a alternativa mais ideal, de Venda, é aquela que mais vantagens trás à Força Aérea Portuguesa, neste momento, pois é bastante influenciada pelo orçamento atual (critério mais importante), pelo retorno monetário que poderá ser obtido.

Tabela 5. 38 - Dados AHP da Opção Venda

<b>Critérios</b>	<b>Percentagem</b>
Fiabilidade (C1)	20,47%
Preservação Material (C2)	30,66%
Diminuição Risco (C3)	16,33%
Orçamento Anual (C4)	59,51%
Missão (C5)	19,98%

Contudo, esta alternativa é bastante influenciada também pelo critério de preservação material, sendo que será necessário ser executado um planeamento de preservação das aeronaves Alpha Jet, de modo a preservar os bens e fiabilidade das aeronaves e diminuir a degradação dos mesmos, desde a paragem das aeronaves (janeiro 2018) até que exista um comprador, com o intuito de maximizar o lucro.

De referir, no entanto, este planeamento de preservação é aplicável tanto à alternativa de museu como à alternativa de reativação, com o propósito de evitar ao máximo a degradação do património nacional em exposição e reduzir ao máximo o esforço de manutenção na reativação.

Nota: este planeamento de preservação das aeronaves Alpha Jet, encontra-se no Anexo B.



## 6. Conclusões e Recomendações

Nesta dissertação, o modelo apresentado de suporte à decisão utilizando uma abordagem multicritério para criação de valor a uma frota de aeronaves no período de degradação, permite concluir que um prolongamento de operação da frota Alpha Jet não é uma alternativa viável, sendo considerada a solução com menor preferência. No entanto, alternativa preferida é a de venda, de referir que será aconselhável a aplicação de um planeamento de preservação das aeronaves, de modo a não ocorrer uma degradação mais acelerada dos seus materiais e constituintes pela não utilização, pois o momento da compra é desconhecido, mas também para reduzir ao máximo o esforço de manutenção do comprador ao repor a frota ao estado aeronavegável.

As alternativas de museu e reativação, caso alguma destas alternativas fosse aquela com maior preferência, seria aconselhável também a aplicação de um planeamento de preservação das aeronaves, para diminuir a velocidade de degradação dos constituintes das aeronaves, mas também reduzir ao máximo o esforço de manutenção, em caso de reativação das aeronaves.

Caso o prolongamento operacional fosse viável, o planeamento de manutenção a aplicar seria aquele associado ao critério de Diminuição de Risco (C3), ou seja, as ações de manutenção subcontratadas para a revisão geral dos módulos 3 e 5, de modo a regenerar potencial, índices de fiabilidade e de segurança. Seria, no entanto, mais viável encomendar novo estudo de extensão de vida de fadiga, permitindo assim estender a operação da frota até um IF maior que 150%, para que o investimento feito nos módulos 3 e 5 fosse aproveitado de uma maneira mais eficaz. Apoiando-se nesta premissa de um novo estudo de extensão de vida de fadiga, seria necessário efetuar as inspeções *Depot* a todas as aeronaves a partir do segundo semestre de 2020, à exceção de uma aeronave que só seria necessário em 2023.

A aplicação do Diagrama Causa-Efeito revelou ser uma ferramenta bastante ilustrativa, de fácil aplicação e de fácil compreensão numa fase inicial do problema em causa, revelando as principais fontes e causas que resultam num determinado efeito ou problema.

Da aplicação da análise FMEA permitiu verificar-se que apesar de permitir avaliar em maior profundidade os modos de falha, de modo a revelar os mais críticos que

comprometem a operação do sistema (motor), a fórmula de RPN é algo sensível a variações dos três fatores de risco pois estes são dificilmente avaliados com precisão, mesmo através das tabelas adaptadas para avaliação dos critérios em relação ao caso de estudo. Em estudos futuros considera-se que a aplicação fuzzy ao FMEA poderá ser benéfico numa avaliação mais precisa dos modos de falha, pois a importância relativa dos três fatores de risco é considerada no cálculo RPN.

Como era de esperar, os resultados FMEA apenas permitem tomar decisões ao nível operacional, no entanto a sua aplicação híbrida com os métodos de análise de decisão multicritério AHP e TOPSIS, possibilitou elevar, com sucesso, a tomada de decisão ao um nível estratégico, pois permitiu, através de simples cálculos matemáticos, hierarquizar e seleccionar a melhor alternativa segundo os mais variados critérios, fossem eles imprecisos ou ambíguos. No entanto, da análise AHP permitiu reter-se que é um processo bastante moroso na cotação dos vários critérios, devendo-se às várias iterações de avaliação até que seja obtida uma razão de consistência aceitável. De referir, para futuros estudos a aplicação da lógica fuzzy ao AHP poderá colmatar esta limitação da seleção e atribuição de valores concretos, baseados na escala de Saaty, a problemas da vida real onde existem níveis de incerteza e subjetividade. Já a aplicação do TOPSIS, retém-se que esta ferramenta permite uma avaliação de preferência mais fiável, de critérios em relação às alternativas, de fácil e de menor tempo aplicação, comparando com a aplicação do AHP.

Em termos da hierarquia de alternativas desenvolvida pelo AHP e pelo TOPSIS, concluiu-se que a utilização destas duas ferramentas de análise de decisão multicritério dota este modelo proposto de mais alguma validade e consistência de resultados, pois a alternativa com maior preferência foi obtida pelas duas ferramentas, apesar das restantes alternativas terem registado uma ligeira alteração na sua ordem de preferência. Apesar do modelo MSD - GECA ter seguido a linha de orientação de que o AHP é utilizado na ponderação dos critérios e o TOPSIS na seleção da alternativa mais ideal, seria possível ao decisor utilizar unicamente o AHP ou o TOPSIS no ultimo pilar do modelo, pois ambas as ferramentas têm a capacidade de obter uma hierarquia de alternativas.

Por fim, a aplicação do modelo proposto não se restringe à indústria de manutenção aeronáutica, pois a sua estruturação permite uma tomada de decisão eficaz, válida e consistente, baseada em múltiplos critérios, de modo a haver uma avaliação e gestão estratégica segundo a condição dos ativos, numa outra indústria.



## Bibliografia

- Abdelgawad, M.; Fayek, A. (2010). Risk Management in the Construction Industry Using Fuzzy FMEA and Fuzzy AHP. *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 36, n° 9: pp. 1028 – 1036;
- Abreu, A.; Calado, J.; Requeijo, J. (2016). Buildings Lean Maintenance Implementation Model. *Open Engineering*, Vol. 6, n° 1, pp. 397-406;
- Abreu, A.; Calado, J.; Vargas, J. (2015a). Aplicação da lógica difusa para avaliar o nível lean de uma organização. *Proceedings of ICEUBI2015 – International Conference on Engineering, Engineering for Society*, 2 - 4 de Dezembro, Covilhã, Portugal;
- Abreu, A.; Calado, J.; Pêgo, E. (2015b). Planeamento da manutenção preventiva usando algoritmos genéticos. *Proceedings of ICEUBI2015 – International Conference on Engineering, Engineering for Society*, 2 - 4 de Dezembro, Covilhã, Portugal;
- Abreu, L.; Granemann, S.; Gartner, I.; Bernardes, R. (2000). Escolha de um Programa de Controle da Qualidade da Água para Consumo Humano: Aplicação de Método AHP. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Vol. 4, n° 2, pp. 257 – 262;
- Ackert, S. (2010). *Basics of Aircraft Maintenance Programs for Financiers - Evaluation e Insights of Commercial Aircraft Maintenance Programs*. Aircraft Monitor;
- Ahmadi, M.; Behzadian, K.; Ardeshir, A.; Kapelan, Z. (2016). Comprehensive risk management using fuzzy FMEA and MCDA techniques in highway construction projects. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 23, n° 2, pp. 300 – 310;
- Ahmadi, A.; Khouy, I.; Kumar, U.; Schunnesson, H. (2009). Selection of Maintenance Strategy, using Analytical Hierarchy Process. *Communications in Dependability and Quality Management*, Vol. 12, n° 1, pp. 121 – 132;
- Ahmadi, A.; Soderholm, P.; Kumar, U. (2010a) On aircraft schedule maintenance program development. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 16, n° 3, pp. 229 – 255;

- Ahmadi, A.; Gupta, S.; Karim, R.; Kumar, U. (2010b). Selection of Maintenance Strategy for Aircraft Systems Using Multi-Criteria Decision Making Methodologies. *International Journal of Reliability, Quality, and Safety Engineering*, Vol. 17, n° 3, pp. 223 – 243;
- Ahmed, A.; Kayis, B.; Amornsawadwatana, S. (2007). An review of techniques for risk management in projects. *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 14, n° 1, pp. 22 – 36;
- Ahuja, I.; Khamba, J. (2008). Total productive maintenance: literature review and directions. *International Journal of Quality e Reliability Management*, Vol. 25, n° 7, pp. 709 – 756;
- Al-Najjar, B.; Alsyouf, I. (2003). Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decision making. *International Journal of Production Economics*, Vol. 84, n° 1, pp. 85 – 100;
- Alfares, H. (1999). Aircraft maintenance workforce scheduling: A case study. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 5, n° 2, pp. 78 – 88;
- ANAC. (2017). ANAC: Atribuições e Competências, consultado em <http://www.inac.pt/vPT/Generico/ANAC/Atribuicoes/Paginas/AtribuicoesCompetencias.aspx>, a 30 de Maio de 2017;
- Andersson, R.; Manfredsson, P.; Lantz, B. (2015). Total productive maintenance in support processes: an enabler for operation excellence. *Total Quality Management e Business Excellence*, Vol. 26, n° 10, pp. 1042 – 1055;
- Arslankaya, S.; Atay, H. (2015). Maintenance Management and Lean Manufacturing Practices in a Firm Which Produces Dairy Products. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, Vol. 207, pp. 214 – 224;
- Arunraj, N.; Maiti, J. (2006). Risk-based maintenance – Techniques and applications. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 142, pp. 653 – 661;
- Arunraj, N.; Maiti, J. (2010). Risk-based maintenance policy selection using AHP and goal programming. *Journal of Safety Science*, Vol. 48, n° 2, pp. 238 – 247;
- Arvanitoyannis, I.; Varzakas, T. (2007). Application of failure mode and effects analysis (FMEA), cause and effect analysis and Pareto diagram in conjunction with HACCP to a potato chips manufacturing plant. *International Journal of Food Science and Technology*, Vol. 42, pp. 1424 – 1442;

- Arvanitoyannis, I.; Varzakas, T. (2009). Application of failure mode and effects analysis (FMEA) and cause and effect analysis for industrial processing of common octopus (*Octopus vulgaris*) – Part II. *International Journal of Food Science and Technology*, Vol. 44, pp. 79 – 92;
- Ayeni, P.; Baines, T.; Lightfoot, H.; Ball, P. (2011). State-of-the-art of ‘Lean’ in Aviation Maintenance Repair Overhaul Industry. *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 225, n° 11, pp. 2108 – 2123;
- Bana e Costa, C.; Vansnick, J. (2008). A critical analysis of the eigenvalue method used to derive priorities in AHP. *European Journal of Operational Research*, Vol. 187, n° 3, pp. 1422 – 1428;
- Behzadian, M.; Otaghsara, S.; Yazdani, M.; Ignatius, J. (2012). A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *International Journal of Expert Systems with Applications*, Vol. 39, n° 17, pp. 13051 – 13069;
- Belton, V.; Stewart, T. (2002). *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*. Kluwer Academic Publications. Boston, USA;
- Berrittella, M.; La Franca, L.; Zito, P. (2009). An analytic hierarchy process for ranking operating costs of low cost and full service airlines. *Journal of Air Transport Management*, Vol. 15, n° 5, pp. 249 – 255;
- Bian, T.; Zheng, H.; Yin, L.; Deng, Y.; Mahadevan, S. (2016). Failure mode and effects analysis based on D numbers and TOPSIS. *Artificial Intelligence*, pp. 1 – 39;
- Borgovini, R.; Pemberton, S.; Rossi, M. (1993). *Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis (FMECA)*. Reliability Analysis Center. New York, USA;
- Bhushan, N.; Rai, K. (2004). *Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process*. Springer-Verlang;
- Braglia, M. (2000). MAFMA: multi-attribute failure mode analysis. *International Journal of Quality e Reliability Management*, Vol. 17, n° 9, pp. 1017 – 1033;
- Bussel, G.; Zaaier, M. (2001). Reliability, Availability and Maintenance aspects of large-scale offshore wind farms, a concepts study. *Proceedings of the 2-day International Conference on Marine Renewable Energies*, 27 – 28 de Março, Newcastle, UK;
- Cabral, J. (2006). *Organização e gestão da manutenção: dos conceitos à prática*. 6ª Edição, Lidel Edições Técnicas. Lisboa;

- Carbone, T.; Tippett, D. (2004). Project Risk Management Using the Project Risk FMEA. *Engineering Management Journal*, Vol. 16, n° 4, pp. 28 – 35;
- Carretero, J.; Pérez, J.; Garcá-Carballeira, F.; Calderón, A.; Fernández, J.; García, J.; Lozano, A.; Cardona, L.; Cotaina, N.; Prete, P. (2003). Applying RCM in large scale systems: a case study with railway networks. *Reliability Engineering e System Safety*, Vol. 82, n° 3, pp. 257 – 273;
- Cay, T.; Uyan, M. (2013). Evaluation of reallocation criteria in land consolidation studies using the Analytic Hierarchy Process (AHP). *Journal of Land Use Policy*, Vol. 30, n° 1, pp. 541 – 548;
- Certa, A.; Enea, M.; Galante, G.; Lupo, T. (2013). A multi-decision makers approach to select the maintenance plan for a multi-component system. *Proceedings of 19th ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design*, 5 – 7 de Agosto, Hawaii, USA;
- Chan, F.; Lau, H.; Ip, R. e Chan, H.; Kong, S. (2005). Implementation of total productive maintenance: A case study. *International Journal Production Economics*, Vol. 95, n° 1, pp. 71 – 94;
- Chang, K. (2009). Evaluate the orderings of risk for failure problems using a more general RPN methodology. *Microelectronics Reliability*, Vol. 49, n° 12, pp. 586 – 1596;
- Chang, K.; Cheng, C.; Chang, Y. (2010). Reprioritization of failures in a silane supply system using an intuitionistic fuzzy set ranking technique. *Soft Computing – A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications*, Vol. 14, n° 3, pp. 285 – 298;
- Chin, K-S.; Wang, Y-M.; Poon, G.; Yang, J-B. (2009). Failure mode and effects analysis using a group-based evidential reasoning approach. *Computers e Operations Research*, Vol. 36, n° 6, pp. 1768 – 1779;
- Chiu, M-C.; Hsieh, M-C. (2016). Latent human error analysis and efficient improvement strategies by fuzzy TOPSIS in aviation maintenance tasks. *Applied Ergonomics*, Vol. 54, pp. 136 – 147;
- Chu, M-T.; Shyu, J.; Tzeng, G-H.; Khosla, R. (2007). Comparison among three analytical methods for knowledge communities group-decision analysis. *Expert Systems with Applications*, Vol. 33, n° 4, pp. 1011 – 1024;

- Cicek, K.; Celik, M. (2013). Application of failure modes and effects analysis to main engine crankcase explosion failure on-board ship. *Safety Science*, Vol. 51, nº 1, pp. 6 – 10;
- CNPGB. (2005). Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens - 1º Relatório de progresso do grupo de trabalho de análise de riscos em barragens, consultado em <http://cnpgb.apambiente.pt/imagens/relProgJaneiro05.pdf>, a 30 de Março de 2016;
- Cohen, M.; Wille, J. (2006). *Implications for Service Parts Management in the Rapidly Changing Aviation MRO Market*. The Wharton School: University of Pennsylvania;
- Cokorilo, O.; Gvozdenovic, S.; Mirosavljevic, P.; Vasov, L. (2011). Multi attribute decision making: Assessing the technological and operational parameters of an aircraft. *Journal of Transport*, Vol. 24, nº 4, pp. 352 – 356;
- Cua, K.; Mckone, K.; Schroeder, R. (2001). Relationships between implementation of TQM, JIT and TPM and manufacturing performance. *Journal of Operations Management*, Vol. 19, nº 6, pp. 675 – 694;
- Deloux, E.; Castanier, B.; Bérenguer, C. (2009). Predictive maintenance policy for a gradually deteriorating system subject to stress. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 94, nº 2, pp. 418 – 431;
- Demirtas, O. (2013). Evaluating the Core Capabilities for Strategic Outsourcing Decisions at Aviation Maintenance Industry. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 99, pp. 1134 – 1143;
- Dowlatshahi, S. (2008). The role of industrial maintenance in the maquiladora industry: An empirical analysis. *International Journal of Production Economics*, Vol. 114, nº 1, pp. 298 – 307;
- Elsayed, E. (2012). *Reliability Engineering*. 2ª Edição, Wiley. New Jersey, USA;
- EN 60812. (2006). *Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effect analysis (FMEA)*. Commission Electrotechnique Internationale. Geneve, Switzerland;
- Emovon, I.; Norman, R.; Murphy, A.; Pazouki, K. (2015). An integrated multicriteria decision making methodology using compromise solution methods

- for prioritizing risk of marine machinery systems. *Ocean Engineering*, Vol. 105, pp. 92 – 103;
- Emovon, I. (2016). Ship System Maintenance Strategy Selection Based on DELPHI – AHP – TOPSIS Methodology. *World Journal of Engineering and Technology*, Vol. 4, n° 2, pp. 252 – 260;
  - Emovon, I. (2016). Failure Mode and Effects Analysis of Ship Systems using an Integrated Dempster Shafer Theory and Electre Method. *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 10, n° 1, pp. 45 – 60;
  - Emovon, I.; Norman, R.; Murphy, A. (2016). Elements of Maintenance Systems and Tools for Implementation within the framework of Reliability Centred Maintenance – A Review. *Journal of Mechanical Engineering and Technology*, Vol. 8, n° 2, pp. 1 – 34;
  - Faiz, R.; Edirisinghe, E. (2009). Decision Making for Predictive Maintenance in Asset Information Management. *Interdisciplinary Journal of Information, Knowledge, and Management*, Vol. 4, pp. 23 – 36;
  - Ferreira, L. (2004). *Estratégias de Manutenção e Análise de Risco*. Seminário ATEHP-APMI sobre Manutenção, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;
  - Fischer, K.; Besnard, F.; Bertling, L. (2012). Reliability-Centered Maintenance for Wind Turbines Based on Statistical Analysis and Practical Experience. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 27, n° 1, pp. 184 – 195;
  - Florio, Filippo (2011). *Airworthiness: An Introduction to Aircraft Certification*, 2nd Edition, Elsevier Butterworth-Heinemann. Oxford, UK;
  - Força Aérea Portuguesa. (1981). *RFA 401-1: Regulamento de Manutenção de Aeronaves da Força Aérea (REMAFA)*. Alfragide, Portugal;
  - Força Aérea Americana. (2014). *AIR FORCE TO 1-1-686: Desert Storage Preservation and Process Manual for Aircraft, Aircraft Engines, and Aircraft Auxiliary Power Unit Engines*. USA;
  - Gabbar, H.; Yamashita, H.; Suzuki, K.; Shimada, Y. (2003). Computer-aided RCM-based plant maintenance management system. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 19, n° 5, pp. 449 – 458;

- Garrido, M.; Ruotolo, M.; Ribeiro, F.; Naked, H. (2011). Risk identification techniques knowledge and application in the Brazilian construction. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, Vol. 2, n° 11, pp. 242 – 252;
- Ghobbar, A.; Friend, C. (2003). Evaluation of forecasting methods for intermittent parts demand in the field of aviation: a predictive model. *Computers e Operations Research*, Vol. 30, n° 14, pp. 2097 – 2114;
- Gluch, P.; Baumann, H. (2004). The life cycle costing (LCC) approach: a conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making. *Buildings and Environment*, Vol. 39, n° 5, pp. 571 – 580;
- Goossens, A.; Basten, R. (2015). Exploring maintenance policy selection using the Analytic Hierarchy Process: An application for naval ships. *Reliability Engineering e System Safety*, Vol. 142, pp. 31 – 41;
- Gorjian, N.; Ma, L.; Mittinty, M.; Yarlagadda, P.; Sun, Y. (2017). A review on Degradation Models in Reliability Analysis. *Proceedings of the 4th World Congress on Engineering Asset Management*, 28 – 30 de Setembro, Atenas, Grécia;
- Greening, L.; Bernow, S. (2004). Design of coordinated energy and environmental policies: use of multi-criteria decision-making. *Energy Policy*, Vol. 32, n° 6, pp. 721 – 735;
- Grubisic, V.; Ogliari, A.; Gidel, T. (2011). Recommendations for risk identification method selection according to product design and project management maturity, product innovation degree and project team. *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11)*, 15 – 18 de Agosto, Copenhagen, Denmark;
- Guitouni, A.; Martel, J. (1998). Some Guidelines for Choosing na MCDA Method Appropriate to a Decision-Making Context. *European Journal of Operational Research*, Vol. 109, n° 2, pp. 501 – 521;
- Gurung, S.; Phipon, R. (2016). Multi-criteria decision making for supplier selection using AHP and TOPSIS method. *International Journal of Engineering Inventions*, Vol. 6, n° 2, pp. 13 – 17;
- Hampson, I.; Junor, A.; Gregson, S. (2012). Missing in action: aircraft maintenance and the recent “HRM in the airlines’ literature”. *The International Journal of Human Resource Management*, Vol. 23, n° 12, pp. 2561 – 2575;

- Hines, P.; Holweg, M.; Rich, N. (2004). Learning to evolve: A review of contemporary lean thinking. *International Journal of Operations e Production Management*, Vol. 24, n° 10, pp. 994 – 1011;
- Hobbs, B.; Horn, G. (1997). Building public confidence in energy planning: a multimethod MCDM approach to demand-side planning at BC gas. *Energy Policy*, Vol. 25, n° 3, pp. 357 – 375;
- Horenbeek, A.; Pintelon, L. (2014). Development of a maintenance performance measurement framework – using the analytic network process (ANP) for maintenance performance indicator selection. *Omega: The International Journal of Management Science*, Vol. 42, n° 1, pp. 33 – 46;
- Houssin, R.; Coulibaly, A. (2014). Safety-based availability assessment at design stage. *Computers e Industrial Engineering*, Vol. 70, pp. 107 – 115;
- Huang, I.; Keisler, J.; Linkov, I. (2011). Multi-criteria analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Science of the Total Environment*, Vol. 409, n° 19, pp. 3578 – 3594;
- ICAO, (2017). Making an ICAO Standard, consultado em <https://www.icao.int/safety/airnavigation/Pages/standard.aspx>, a 30 de Maio de 2017;
- Ilie, G.; Ciocoiu, C. (2010). Application of Fishbone Diagram to determine the risk of an event with multiple causes. *Management Research and Practice*, Vol. 2, n° 1, pp. 1 – 20;
- Ioannis, D.; Nikitas, N. (2013). Application of Analytic Hierarchy Process e TOPSIS methodology on ships' maintenance strategies. *Journal of Polish Safety and Reliability Association*, Vol. 4, n° 1, pp. 21 – 27;
- Ishizaka, A. (2011). Clusters and Pivots for Evaluating a Large Number of Alternatives in AHP. *Pesquisa Operacional*, Vol. 32, n° 1, pp. 87 – 101;
- Ishizaka, A.; Balkenborg, D.; Kaplan, T. (2011). Influence of Aggregation and Measurement Scale on Ranking a Compromise Alternative in AHP. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 62, n° 4, pp. 700 – 710;
- Ishizaka, A.; Nemery, P. (2013). *Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software*. 1ª Edição, John Wiley e Sons Ltd. Chichester, UK;
- Iuga, M. e Kifor C. (2013). Lean Manufacturing: The When, The Where, The Who. *Revista Academiei Fortelor Terestre*, Vol. 18, n° 4, pp. 404 – 410;



- Johnson, P. e Niezgoda, S. (2004). Risk-Based Method for Selecting Bridge Scour Countermeasures. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 130, n° 2, pp. 121 – 128;
- Joshi, G.; Joshi, H. (2014). FMEA and Alternatives v/s Enhanced Risk Assessment Mechanism. *International Journal of Computer Applications*, Vol. 93, n° 14, pp. 33 – 37;
- Kalbar, P.; Karmakar, S.; Asolekar, S. (2012). Selection of an appropriate wastewater treatment technology: A scenario-based multiple-attribute decision-making approach. *Journal of Environmental Management*, Vol. 113, pp. 158 – 169;
- Kansal, R.; Sharma, M. (2012). Risk Assessment Methods and Application in the Construction Projects. *International Journal of Modern Engineering Research*, Vol. 2, n° 3, pp. 1081 – 1085;
- Kapur, K. e Pecht, M. (2014). *Reliability Engineering*. Wiley. New Jersey, USA;
- Katayama, K.; Koshiishi, T.; Narihisa, H. (2005). Reinforcement Learning Agents with Primary Knowledge Designed by Analytic Hierarchy Process. *SAC 2005: Proceedings of the 2005 ACM symposium on Applied computing*. 13 - 17 de Março, Santa Fé, New México, USA, pp. 14 – 21;
- Kinnison, H. (2012). *Aviation Maintenance Management*. McGraw-Hill. New York, USA;
- Kumar, A.; Agrawal, V.P. (2009). Attribute based specification, comparison and selection of electroplating system using MADM approach. *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, n° 8, pp. 10815 – 10827;
- Kutlu, A.; Ekmekçioğlu, M. (2012). Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP. *International Journal of Expert Systems with Applications*, Vol. 39, n° 1, pp. 61 – 67;
- Kuznetsov, V.; Fesenko, G.; Schwenk-Ferrero, A.; Andrianov, A.; Kuptsov, I. (2015). Innovative Nuclear Energy Systems: State-of-the Art Survey on Evaluation and Aggregation Judgment Measures Applied to Performance Comparison. *Energies*, Vol. 8, n° 5, pp. 3679 – 3719;
- Lee, S.; Ma, Y-S.; Thimm, G.; Verstraeten, J. (2008). Product lifecycle in aviation maintenance, repair and overhaul. *Computers in Industry*, Vol. 59, n° 2-3, pp. 296 – 303;

- Levitt J. (2008). *Lean Maintenance*. Industrial Press Inc. New York, USA;
- Linkov, I.; Varghese, A.; Jamil, S.; Seager, T.; Kiker, G.; Bridges, T. (2004). Multi-criteria Decision Analysis: A Framework for Structuring Remedial Decisions at Contaminated Sites. *Comparative risk assessment and environmental decision making*, pp. 15 – 54;
- Lipol, L.; Haq, J. (2011). Risk analysis method: FMEA/FMECA in the organizations. *International Journal of Basic e Applied Sciences IJBAS-IJENS*, Vol. 11, n° 5, pp. 74 – 82;
- Liu, H-C.; Liu, L.; Liu, N. (2013). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Journal Expert Systems with Applications*, Vol. 40, n° 2, pp. 828 – 838;
- Loken, E. (2007). Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 11, n° 7, pp. 1584 – 1595;
- Maheswaran, K.; Loganathan, T. (2013). A Novel Approach for Prioritization of Failure modes in FMEA using MCDM. *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 3, n° 4, pp. 733 – 739;
- Mahmoodzadeh, S.; Shahrabi, J.; Pariazar, M.; Zaeri, M. (2007). Project Selection by Using Fuzzy AHP and TOPSIS Technique. *International Journal of Social, Management, Economics and Business Engineering*, Vol. 1, n° 6, pp. 324 – 329;
- Marquez, A.; Gupta, J. (2006). Contemporary maintenance management: process, framework and supporting pillars. *Omega: The International Journal of Management Science*, Vol. 34, n° 3, pp. 313 – 326;
- Mathew, S.; Das, D.; Osterman, M.; Pecht. (2012). Virtual Remaining Assessment of Electronic Hardware Subject to Shock and Random Vibration Life Cycle Loads. *Journal of the IEST*, Vol. 50, n° 50, pp. 86 – 97;
- Mazhar, M.; Kara, S.; Kaebernick, H. (2007). Remaining life estimation of used components in consumer products: Life cycle data analysis by Weibull and artificial neural networks. *Journal of Operations Management*, Vol. 25, n° 6, pp. 1184 – 1193;
- Mazhar, M.; Kara, S.; Kaebernick, H. (2005). Reusability Assessment of Components in Consumer Products – A Statistical and Condition Monitoring Data

- Analysis Strategy. *Proceedings of the 4th Australian LCA*, Fevereiro, Sydney, Austrália;
- McFadden, M.; Worrells, D. (2012). Global Outsourcing of Aircraft Maintenance. *Journal of Aviation Technology and Engineering*, Vol. 1, nº 2, pp. 63 – 73;
  - MESA. (1995). *Maintenance Engineering Society of Australia Capability Assurance: A Generic Model of Maintenance*. Maintenance Engineering Society of Australia (MESA). Australia;
  - MIL-STD-1629A. (1980). *Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*. U.S. Department of Defense. Whashington, DC, USA;
  - Misra, K: (2008). *Handbook of Performability Engineering*. Springer. UK;
  - Mkandawire, B.; Ijumba, N.; Whitehead, H. (2011). Application of maintenance tools and strategies in integrated risk management of critical physical assets. *International Journal Agile Systems and Management*, Vol. 4, nº 3, pp. 261 – 279;
  - Monchy, F; Vernier, JP. (2010). *Maintenance: Méthodes et organisations*. 3<sup>a</sup> Edição, DUNOD. Paris, France;
  - Monden, Y. (2012). *Toyota Production System: An Integrated Approach to Just-In-Time*. 4<sup>a</sup> Edição, CRC Press. New York, USA;
  - Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance*. 2<sup>a</sup>. Edição, Industrial Press Inc. New York, USA;
  - Mraz, M.; Huber, B. (2005). *FMEA-FMECA*. University of Ljubljana, Slovenia;
  - Muchiri, A.; Smit, K. (2011). Optimizing Aircraft Line Maintenance Through Task Re-Clustering and Interval De-Escalation. *Sustainable Research and Innovation Proceedings*, Vol. 3;
  - Muchiri, P.; Pintelon, L.; Gelders, L.; Martin, H. (2011). Development of maintenance function performance measurement framework and indicators. *International Journal of Production Economics*, Vol. 131, nº 1, pp. 295 – 302;
  - Nenni, M. (2013). Cost Assessment for Integrated Logistic Support Activities. *International Journal of Industrial Engineering*, Vol. 20, nº 5-6, pp. 412 – 418;
  - Netjasov, F.; Janic, M. (2008). A Review of the Research on Risk and Safety Modelling in Civil Aviation. *Proceedings of the 3rd International Conference on Research in Air Transportation*, 01 - 04 de Junho, Fairfax, USA, pp. 169 – 176;

- Niu, G.; Yang, B-S.; Pecht, M. (2010). Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusion and reliability-centered maintenance. *Reliability Engineering e System Safety*, Vol. 95, nº 7, pp. 786 – 796;
- Nowlan, F.; Heap, H. (1978). *Reliability-Centered Maintenance*. National Technical Information Service, US Department of Commerce. Springfield, Virginia;
- NP EN 13306. (2007). *Norma Portuguesa para terminologia de manutenção*. Instituto Português da Qualidade. Lisboa, Portugal;
- Nystrom, B.; Soderholm, P. (2010). Selection of maintenance actions using the analytic hierarchy process (AHP): decision-making in railway infrastructure. *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 6, nº 4, pp. 467 – 479;
- Opricovic, S.; Tzeng, G-H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, Vol. 156, nº 2, pp. 445 – 455;
- Pariazar, M.; Shahrabi, J.; Zaeri, M.S.; Parhizi, S. (2008). A Combined Approach for Maintenance Strategy Selection. *Journal of Applied Sciences*, Vol. 8, nº 23, pp. 4321 – 4329;
- Pettersen, J. (2009). Defining lean production: some conceptual and practical issues. *The TQM Journal*, Vol. 21, nº 2, pp. 127 – 142;
- Piedade, R.; Abreu, A. (2017). Planeamento de Manutenção da Frota Alpha Jet, após Phase-Out, da Força Aérea Portuguesa. *Proceedings of ICEUBI2017 – International Congress on Engineering – A Vision for the Future*, 5 - 7 de Dezembro, Covilhã, Portugal;
- Pillay, A.; Wang, J. (2003). Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. *Reliability Engineering e System Safety*, Vol. 79, nº 1, pp. 69 – 85;
- Pintelon, L.; Van Puyvelde, F. (2006). *Maintenance Decision Making*. Acco. Leuven, Belgium;
- Pohekar, S.; Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 8, nº 4, pp. 365 – 381;

- Rau, C.; Necas, P.; Boscoianu, M. (2011). Review of Maintainability and Maintenance Optimization Methods for Aviation Engineering Systems. *Science e Military Journal*, Vol. 2, nº 7, pp. 54 – 60;
- ReliaSoft Corporation. (2015). Softwares de Fiabilidade., consultado em <http://www.reliasoft.com/xfmea/benefits.htm>, a 21 de Março de 2016;
- Rausand, M. (1998). Reliability Centered Maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 60, pp. 121 – 132;
- Resobowo, D.; Buda, K.; Dinariyana, A. (2014). Using Sensitivity Analysis for Selecting of Ship Maintenance Variables for Improving Reliability of Military Ship. *Academic Research International*, Vol. 5, nº 2, pp. 127 – 139;
- Rostami, A. (2016). Tools and Techniques in Risk Identification: A Research within SMEs in the UK Construction Industry. *Universal Journal of Management*, Vol. 4, nº 4, pp. 203 – 210;
- Sachdeva, A.; Kumar, D.; Kumar, P. (2009). Multi-factor mode critically analysis using TOPSIS. *Journal of Industrial Engineering International*, Vol. 5, nº 8, pp. 1 – 9;
- Sakurada, E. (2001). *As técnicas de análise dos modos de falha e seus efeitos e análise da árvore de falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos*. Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis;
- Sasi, J.; Digalwar, A. (2015). Application of AHP and TOPSIS Method for Supplier Selection Between India e China in Textile Industry. *International Research Journal of Engineering and Technology*, Vol. 2, nº 4, pp. 1730 – 1738;
- Savsar, M.; Alardhi, M.; Almazrouee, A. (2012). Capacity and Availability Analysis of Power Plants in Kuwait. *Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 3 – 6 de Julho, Istanbul, Turkey, pp. 1598 – 1607;
- Selvik, J.; Aven, T. (2011). A framework for reliability and risk centered maintenance. *Reliability Engineering e System Safety*, Vol. 96, nº 2, pp. 324 – 331;
- Shah, R.; Ward, P. (2007). Defining and developing measures of lean production. *Journal of Operations Management*, Vol. 25, nº 4, pp. 785 – 805;

- Shahrabi, M.; Shojaei, A. (2014). Application of FMEA and AHP in Lean Maintenance. *International Journal of Modern Engineering Sciences*, Vol. 3, n° 1, pp. 61 – 73;
- Shaw, K.; Shankar, R.; Yadav, S.; Thakur, L. (2012). Supplier selection using fuzzy AHP and fuzzy multi-objective linear programming for developing low carbon supply chain. *Expert System with Applications*, Vol. 39, n° 9, pp. 8182 – 8192;
- Shiao, M. (2005). Risk-based Maintenance Optimization. *Proceedings of the International Conference on Structural Safety and Reliability*, Rome, Italy, pp. 3231 – 3237;
- Silva, S.; Fonseca, M.; Brito, J. (2006). *Metodologia FMEA e sua aplicação à construção de edifícios*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, Portugal;
- Smith, R.; Hawkins, B. (2004). *Lean maintenance; reduce cost, improve quality, and increase market share*. Elsevier Butterworth-Heinemann. Oxford, UK;
- Snecma. (2010). *General BMECG-10 Larzac 04 C20 Turbofan Engine: Maintenance Manual*. Safran Turbomeca. France;
- Song, W.; Ming, X.; Wu, Z.; Zhu, B. (2014). A rough TOPSIS Approach for Failure Mode and Effects Analysis in Uncertain Environments. *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 30, n° 4, pp. 473 – 486;
- Srikrishna, S.; Sreenivasulu, R.; Vani, S. (2004). A New Car Selection in the Market using TOPSIS Technique. *International Journal of Engineering Research and General Science*, Vol. 2, n° 4, pp. 177 – 181;
- Sriram, C.; Haghani, A. (2003). An optimization model for aircraft maintenance scheduling and re-assignment. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 37, n° 1, pp. 29 – 48;
- Stamatis, D. (2003). *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*. ASQ Quality Press. Milwaukee, Wisconsin, USA;
- Steiguer, J.; Duberstein, J.; Lopes, V. (2003). The Analytic Hierarchy Process as a Means for Integrated Watershed Management. *Proceedings of the 1<sup>st</sup> Interagency Conference on Research on the Watersheds*, Benson, Arizona, pp. 736 – 740;

- Szkoda, M. (2014). Assessment of reliability, availability and maintainability of rail gauge change systems. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, Vol. 16, n°3, pp. 422 – 432;
- Takata, S.; Kimura, F.; Houten, F.; Westkamper, E.; Shpitalni, M.; Ceglarek, D.; Lee, J. (2004). Maintenance: Changing Role in Life Cycle Management. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 53, n° 2, pp. 643 – 655;
- Tay, K.; Lim, C. (2006). Fuzzy FMEA with a guided rules reduction system for prioritization of failures. *International Journal of Quality e Reliability Management*. Vol. 23, n° 8, pp. 1047 – 1066;
- Tont, G.; Iliescu, M.; Tont, D. (2008). A Methodology of Availability Assessment for Complex Manufacturing Systems. *Wseas Transactions on Systems*, Vol. 7, n° 6, pp. 822 – 832;
- Vaidya, O.; Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operations Research*, Vol. 169, n°1, pp. 1 – 29;
- Vicêncio, J. (2017). Aviação Militar: Poder Aéreo Desvendado. *INGENIUM: Engenharia Aeronáutica em Portugal*, n° 157, pp. 38 – 39, consultada a 01 de Maio de 2017;
- Vieira, D.; Loures, P. (2016). Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) Fundamentals and Strategies: An Aeronautical Industry Overview. *International Journal of Computer Applications*, Vol. 135, n° 12, pp. 21 – 29;
- Wan, C.; Yan, X.; Zhang, D.; Shi, J.; Fu, S. (2014). Facilitating AHP – TOPSIS Method for Reliability Analysis of a Marine LNG – Diesel Dual Fuel Engine. *International Journal of Performability Engineering*, Vol. 10, n° 5, pp. 453 – 466;
- Wang, J.; Jing, Y.; Zhang, C.; Zhao, J. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, n° 9, pp. 2263 – 2278;
- Wilmeth, R.; Usrey, M. (2000). Reliability-Centered Maintenance: A Case Study. *Engineering Management Journal*, Vol. 12, n° 4, pp. 25 – 31;
- Wireman, T. (2004). *Total Productive Maintenance*. Industry Press Inc. New York, USA;
- Wireman, T. (2005). *Developing Performance Indicators for Managing Maintenance*. Industry Press Inc. New York, USA;

- Womack, P.; Jones, D. (1996). Beyond Toyota: How to root out waste and pursue perfection. *Harvard Business Review*, pp. 140 – 158;
- Womack, P.; Jones, D. (2003). *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. Free Press. New York, USA;
- Xu, K.; Tang, L.; Xie, M.; Ho, S.; Zhu, M. (2002). Fuzzy assessment of FMEA for engine systems. *Reliability Engineering e System Safety*, Vol. 75, n° 1, pp. 17 – 29;
- Yamashina, H. (1995). Japanese manufacturing strategy and the role of total productive maintenance. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 1, n° 1, pp. 27 – 38;
- Youssouf, A.; Rachid, C.; Ion, V. (2014). Contribution to the Optimization of Strategy of Maintenance by Lean Six Sigma. *Physics Procedia*, Vol. 55, pp. 512 – 518;
- Zhang, S.; Sun, B.; Yan, L.; Wang, C. (2013). Risk identification on hydropower project using the IAHP and extension of TOPSIS methods under interval-valued fuzzy environment. *Natural hazards*, Vol. 65, n° 1, pp. 359 – 373.



## Anexo A – Programa de Manutenção da Aeronave Alpha Jet

Tabela A. 1 – Inspeções Periódicas Programadas de Célula

Frequência	HPO	1PE	2PE	DI
HV	250	500	1000	2000
Anos	-	-	-	10

Tabela A. 2 – Inspeções Especiais da Aeronave Alpha Jet

Nomenclatura	Descrição
1SP	Excesso de G's (Carga Limite de Projeto)
2SP	Excesso de velocidade com flap's
3SP	Excesso de velocidade com trem
4SP	Aterragem dura/ Pneu rebentado/ Excesso de velocidade de rolagem
5SP	Aterragem com excesso de peso
6SP	Aterragem com gancho
7SP	Aterragem atingida por raio
8SP	6 Meses
9SP	Imobilização de 7 a 30 dias
10SP	Imobilização de 30 a 180 dias
11SP	Imobilização superior a 180 dias
16SP	Baixa pressão de óleo
17SP	Vibrações excessivas
18SP	Perda de compressor
19SP	FOD/ <i>Bird Strike</i> / Voo baixo com armamento
20SP	Óleo do motor contaminado
21SP	25 Horas de Voo
22SP	Excesso de EGT (sobreaquecimento) durante o arranque do motor
23SP	14 dias da cadeira de ejeção
24SP	Excesso de RPM
27SP	Excesso de EGT (sobreaquecimento) durante a operação do motor
29SP	250 Horas de Voo aos pylons
30SP	Excesso dos limites de manobras (G's)
31SP	3 Meses

Tabela A. 3 – Inspeções Periódicas Programadas de Motores

Frequência	HPO	EPE	Partículas Magnéticas	SOAP	Injetores de Ignição	Vibrações
HV	250	500	12:30	25	125 ± 25	50 ou 100



## **Anexo B – Planeamento de Preservação da Frota Alpha Jet**

A Preservação de materiais na indústria aeronáutica define-se como os procedimentos adotados para o controlo de corrosão de componentes metálicos, controlo de deterioração de componentes não metálicos e minimização/mitigação de danos físicos às aeronaves, e seus componentes, durante o processo de transporte e armazenamento (Força Aérea Americana, 2014).

Este Planeamento visa a preservação da frota Alpha Jet da Força Aérea Portuguesa, após o Phase Out, ou seja, o término de operação em janeiro de 2018. Terá então como objetivo principal a preservação do património nacional, em caso de venda ou exposição dos meios em museu ou em caso de uma eventual reativação dos meios a entidades exteriores.

Devido à inexistência de publicações específicas da aeronave Alpha Jet que abordem o tema da preservação, o presente planeamento de preservação da frota Alpha Jet seguirá por linhas gerais a AIR FORCE TO 1-1-686, da Força Aérea Americana, que aborda o processo da preservação e do armazenamento de aeronaves no deserto. Esta publicação técnica é aplicada ao armazenamento de aeronaves, motores e seus equipamentos em condições de deserto.

Em diversos casos, serão aplicados alguns procedimentos de armazenamento do fabricante da aeronave. Caso exista conflito entre os procedimentos do fabricante e a publicação AIR FORCE TO 1-1-686, a publicação terá precedência, exceto se:

- Os procedimentos da publicação danifiquem os equipamentos;
- Certos componentes/equipamentos não sejam abrangidos pela publicação.

Segundo a publicação técnica, acima referida, será aplicada o seguinte tipo de preservação à frota Alpha Jet:

### **I. Preservação Type 1500.**

Este tipo de preservação material é utilizado para tempos indefinidos de armazenamento, eliminando assim trabalhos de represervação. Como não há uma represervação continuada, terá de se ter em conta uma maior deterioração dos componentes. O procedimento de preservação aplicado segue a seguinte metodologia:

*Nota:* Os trabalhos de preservação de longa duração deverão levar cerca de 60 dias a serem concluídos. Caso os trabalhos sejam efetuados em condições de tempo adversas, serão admissíveis mais 15 dias para finalização dos trabalhos.

### 1. Preparação da Aeronave.

- ✓ Deve-se iniciar com a remoção de todos os equipamentos perecíveis, como:
  - Paraquedas;
  - Kits de sobrevivência;
  - Baterias.
- ✓ Capotar a aeronave com as suas proteções;
- ✓ Os pneus deverão ter a pressão mínima de operação (considerado o peso mínimo da aeronave), para serem movimentados em segurança durante os reboques.

### 2. Limpeza, Controlo de Corrosão e Lubrificação.

- ✓ Limpeza de Aeronaves: As aeronaves deverão ser sujeitas a uma limpeza exterior geral utilizando o composto **MIL-PRF-85570**;
- ✓ Limpeza de Motores: Os motores deverão sofrer uma limpeza exterior utilizando o **MIL-PRF-680 SOLVENT DEGREASING TYPE II**. (Tempo de aplicação de 10 minutos e subsequente lavagem com água normal).

### 3. Lubrificação.

A lubrificação tem como objetivo prevenir a contaminação das superfícies metálicas de poeiras, água e outros agentes. Em certos casos, a lubrificação é um método de prevenção adequado à corrosão (Força Aérea Americana, 2014).

- ✓ O composto usado na lubrificação das aeronaves e seus componentes expostos aos compostos de limpeza, designa-se por **MIL-PRF-81322 GREASE AIRCRAFT GENERAL PURPOSE**;
- ✓ A lubrificação deverá ser efetuada antes e depois de uma limpeza da aeronave/componentes.

#### 4. Revestimento de Equipamentos Eletrônicos/Elétricos.

No caso de equipamentos eletrônicos e elétricos serem expostos aos agentes exteriores, esses componentes devem ser revestidos do componente **A-A-3174**, que servirá de barreira contra esses elementos.

#### 5. Fuselagem.

##### Cabos de aço, tirantes e bellcranks (Comandos de Voo):

- ✓ Revestir todos os cabos de aço, tirantes e bellcranks de uma película de **MIL-PRF-680 SOLVENT DEGREASING TYPE II**;
- ✓ Caso sejam encontrados indícios de corrosão, remover esses indícios da superfície afetada com uma escova / pincel.

Cockpits: Os cockpits terão de ser aspirados, e caso haja necessidade de remover óleos ou gorduras deverá ser aplicado o **MIL-PRF-680 TYPE I**.

Drenos: Manter sempre os drenos abertos.

Superfícies de Aço Expostas (Exterior Fuselagem): Aplicar uma fina película do composto **MIL-PRF-16173 Grade2**, às superfícies de aço expostas, de maneira a prevenir a ocorrência de corrosão.

Dobradiças: As dobradiças, após serem limpas, deverão ser preservadas com o composto anticorrosivo **MIL-PRF-81309 Type II**.

##### Flaps:

- ✓ Flaps estejam totalmente distendidos;
- ✓ Quando distendidos, cobrir os parafusos sem fim e as calhas com o composto **MIL-PRF-81322 grease**;
- ✓ Recolher os flaps para a sua posição inicial.

##### Superfícies Exteriores (pintadas ou não):

- ✓ Selar todas as aberturas da aeronave com o material **MIL-PRF-131 Class 3** e utilizar fita **SAE-AMS-T-22085 Type II** para fixar o material, prevenindo assim a entrada de poeiras e água;
- ✓ Se houver necessidade de proteção anticorrosiva, cobrir o material **MIL-PRF-131 Class 3** e fita **SAE-MAS-T-22085 Type II** com o composto **MIL-PRF-16173 Grade 1** ou pelo composto removível **MIL-PRF-6799 Type II**;
- ✓ Superfícies que sejam necessárias a proteção de pintura, aplicar o composto de proteção **MIL-PRF-6799 Type II**.

Materiais Compósitos: Caso existam superfícies compostas por materiais compósitos, proteger essas superfícies com o material *MIL-PRF-131 Class 3* e utilizar fita *SAE-AMS-T-22085 Type II* para fixar o material.

#### 6. Sistemas de Armamento.

Todos os compostos pirotécnicos deverão ser removidos da aeronave e armazenados em conformidade com a sua classe.

#### 7. Sistemas Elétricos.

##### Baterias:

- ✓ Remoção da bateria;
- ✓ Efetuar limpeza dos polos com o *PETROLATUM VV-P-236*;
- ✓ Envolver a bateria com o material *MIL-PRF-121 Class 1 Grade A Type I* e usar fita *SAE-AMS-T-22085 Type II* para fixar o material.

##### Compartimento da Bateria:

- ✓ Limpeza do compartimento com o *MIL-PRF-85570 Type II*;
- ✓ Caso haja sinais de corrosão, utilizar o *MIL-PRF-81309 Type II*.

##### Conectores:

- ✓ Desligar todos conectores elétricos que possam ser vulneráveis a danos causados pela exposição à água;
- ✓ Depois de desligados (desconectados) envolver os mesmos com o material *MIL-PRF-121 Class 1 Grade A Type I* e utilizar fita *SAE-AMS-T-22085 Type II* para fixar o material;
- ✓ Para conectores expostos ao ambiente exterior, cobrir o material *MIL-PRF-121 Class 1 Grade A Type I* e fita *SAE-AMS-T-22085 Type II* com o composto anticorrosivo *MIL-PRF-16173 Grade 1*.

##### Luzes:

- ✓ Procurar, drenar e eliminar a humidade nas luzes e nas respetivas cavidades (casquilhos);
- ✓ Manter as lentes (plástico) exteriores livres de óleos, gorduras e compostos preservantes, exceto as lentes (plástico) interiores à aeronave que deverão ser cobertas pelo composto *MIL-PRF-6799 Type II*.

## 8. Sistemas Eletrônicos.

Antenas: Não será necessário tratamento especial.

Giroscópios: Armazenar todos os giroscópios segundo as especificações do fabricante.

Aviônicos: Limpeza dos equipamentos utilizando o composto *MIL-PRF-85570 Type II* ou o detergente *MIL-D-16791 Type I*.

## 9. Sistemas de Combustível.

- ✓ Fazer defueling e abrir todos os drenos do sistema;
- ✓ Após o defueling, fechar todos os drenos do sistema;
- ✓ Preservar todo o sistema de combustível com o óleo *MIL-PRF-6081 Grade 1010*;
- ✓ Drenar o óleo *MIL-PRF-6081 Grade 1010* em excesso (exceto linhas, válvulas, bombas);
- ✓ Etiquetar o cockpit da aeronave.

## 10. Sistemas Hidráulicos.

*Nota:* Manter o nível normal de óleo (operação) nos sistemas 1 e 2.

Atuadores: Limpeza das hastes dos pistons dos atuadores:

- ✓ Utilizar um pano saturado do composto *MIL-PRF-680 SOLVENT DEGREASING TYPE II*;
- ✓ Utilizar um pano seco para limpar e secar o composto acima utilizado.

Reservatórios de Fluido Hidráulico: Manter o nível normal de óleo (operação) nos reservatórios de fluido hidráulico.

Acumuladores de Pressão: Ajustar a pressão nos acumuladores para cerca de 10% da pressão normal de operação.

## 11. Sistemas Pneumáticos.

Sangrar os sistemas, de modo a aferir existência de água nos sistemas:

- ✓ Se não se verificar a existência de água, os sistemas são considerados prontos;
- ✓ Se se verificar a existência de óleo em algum sistema, esse sistema é considerado contaminado;
- ✓ Se se verificar a existência de água em algum sistema:

- Deverá descarregar-se por completo esse sistema;
- Voltar a carregá-lo de azoto;
- Sangrar o sistema, de modo a aferir a existência de água;
- Repetir este processo até que não se verifique a presença de água.

Sistemas Pneumáticos Parcialmente Desmontados: Selar todas as aberturas nestes sistemas pneumáticos parcialmente desmontados através do uso de tampas (tipo parafuso), capas ou envolver estes sistemas com o material **MIL-PRF-131 Class 3** e utilizar fita **SAE-AMS-T-22085 Type II** para fixar o material.

## 12. Instrumentos.

### Tubos de Pitot e Tomadas Estáticas:

- ✓ Inspeccionar e proceder à limpeza das aberturas, tanto dos tubos de pitot como das tomadas estáticas, caso existam sujidades, óleos, gorduras ou insetos;
- ✓ Drenar todas as tomadas estáticas, de modo a eliminar a existência de água;
- ✓ Colocar as proteções nos tubos de pitot e tomadas estáticas.

## 13. Sistema de Aterragem.

### Preparação:

- ✓ Colocar o pino no interruptor de segurança em terra (2C);
- ✓ Verificar se a manete do trem se encontra na posição DOWN e colocar o pino de segurança;
- ✓ Verificar se a manete do trem de emergência na posição de não atuação (UNRELEASED).

### Amortecedores:

- ✓ Insuflar/carregar os amortecedores até a aeronave atingir a altura normal de operação;
- ✓ Limpeza das hastas dos pistons dos amortecedores (superfícies expostas/exteriores) com o composto **MIL-PRF-680 SOLVENT DEGREASING Type II**;
- ✓ Secagem do composto acima referido, com um pano seco;
- ✓ Todas as superfícies que não sejam cromadas ou pintadas, deverão ser cobertas pelo composto anticorrosivo **MIL-PRF-16173 Grade 1**.



#### Rolamentos e Anéis:

- ✓ Remoção dos pneus;
- ✓ Limpeza de rolamentos e anéis utilizando o solvente **MIL-PRF-680 Type II**;
- ✓ Limpeza e secagem do solvente aplicado, utilizando ar (seco) comprimido;
- ✓ Após limpeza e secagem, lubrificar os rolamentos e anéis com o **MIL-PRF-81322 GREASE**.

#### Atuadores das Portas de Trem:

As hastes dos pistons dos atuadores das portas de trem deverão ser sujeitas a uma limpeza:

- ✓ Utilizar um pano saturado do composto **MIL-PRF-680 SOLVENT DEGREASING TYPE II**;
- ✓ Utilizar um pano seco para limpar e secar o composto acima utilizado.

#### Macacos Bloqueadores de Trem:

- ✓ Limpar as superfícies de deslizamento, normalmente lubrificadas;
- ✓ Lubrificar as estas superfícies com o composto anticorrosivo **MIL-PRF-16173 Grade 2**.

#### Pneus:

- ✓ Os pneus deverão ter a pressão mínima de operação (considerado o peso mínimo da aeronave);
- ✓ Se possível, os pneus e rodas em condições de operacionalidade deverão ser substituídos por pneus e rodas fora dos limites de operacionalidade.

#### 14. Sistemas de Sobrevivência.

- ✓ Remover todos os componentes explosivos e equipamentos de sobrevivência;
- ✓ Devolvê-los à cadeia de abastecimento.

#### Canopys e Superfícies de Plástico:

- ✓ Os seals das canopys deverão ser sujeitos a limpeza de um composto detergente à base de água, **MIL-D-16791 TYPE 1**;
- ✓ Limpeza das canopys e superfícies plásticas com **MIL-PRF-680 SOLVENT DEGREASING TYPE II**;
- ✓ Após a limpeza das canopys e superfícies plásticas, revestir as mesmas com **MIL-PRF-6799 TYPE II**.

#### Sistemas de Ejeção:

- ✓ Limpeza, lubrificação e manutenção das cadeiras de ejeção e seus mecanismos, de acordo com o fabricante.

*Nota:* O armazenamento das cadeiras de ejeção deverá ser num local onde as mesmas não sejam suscetíveis a danos.

#### Equipamento de Oxigénio Gasoso:

- ✓ Armazenamento das garrafas de oxigénio de emergência;
- ✓ Colocar proteções nas tubagens de ligação às garrafas de oxigénio de emergência.

#### Converters de Oxigénio Líquido:

De modo a prevenir o aparecimento de corrosão, deve ser aplicado o seguinte procedimento:

- ✓ Drenar o sistema de acordo com os procedimentos do fabricante;
- ✓ Manter os converters à temperatura ambiente;
- ✓ Purga com *azoto quente* (65,5 °C a 121 °C) *A-A-59503 Type I Class 1*, durante 30 minutos ou mais, até o gás de saída se encontrar a 37,8 °C;
- ✓ Colocar proteções nas válvulas de enchimento, fornecimento e alívio.

Reguladores de Oxigénio: Proteger as aberturas dos reguladores de oxigénio e fichas de ligação (conectores) com o material *MIL-PRF-121 Class 1 Grade A Type 1* e utilizar fita *SAE-AMS-T-22085 Type II* para fixar o material.

#### Paraquedas:

- ✓ Remover paraquedas de encosto de cabeça e arneses;
- ✓ Devolver ao sistema de abastecimento os componentes;
- ✓ Secagem dos paraquedas.

### 15. Sistema de Ar Condicionado.

Turbina e Compressor: Efetuar todas as ações de manutenção preconizadas no manual do fabricante, em termos de preservação ou armazenamento.

Válvulas Anti-G e Reguladoras de Pressão: As válvulas Anti-G, válvulas reguladoras de pressão e válvulas de segurança de pressão deverão ser envolvidas com o material *MIL-PRF-121 Class 1 Grade A Type 1* e utilizar fita *SAE-AMS-T-22085 Type II* para fixar o material.

Difusores: Os difusores deverão ser envolvidos com o material **MIL-PRF-131 Class 3** e utilizar fita **SAE-AMS-T-22085 Type II** para fixar o material.

#### 16. Preservação Sistema de Lubrificação (Motores).

##### Teste ao Óleo de Motor:

- ✓ Após o funcionamento dos motores, examinar o óleo dos motores (aferindo a acidez do óleo e eventual presença de água);
- ✓ Caso o óleo não esteja dentro dos parâmetros normais:
  - Drenar óleo no sistema;
  - Refill com novo óleo;
  - Motor(es) em marcha;
  - Reexame ao óleo;
  - Repetir o processo caso o óleo não se encontre dentro dos parâmetros normais.

Preservação: Aplicar o seguinte procedimento operacional para motores húmidos (lavagem ou elementos atmosféricos) ou secos:

- ✓ Manter o normal nível de óleo (operação);
- ✓ Adicionar o composto anticorrosivo **BRAYCO 599**;
- ✓ Motores em marcha (70 – 80 %):
  - Mínimo de 5 minutos para motores secos;
  - Mínimo de 10 minutos para motores húmidos.

#### 17. Preservação Sistema de Combustível (Motores).

O sistema de combustível dos motores deverá ser preservado com o óleo **MIL-PRF-6081 Grade 1010**, e posteriormente drenado.

*Nota*: Caso os motores estejam montados na aeronave, os sistemas de combustível da aeronave e dos motores, deverão ser preservados da mesma forma (II.9).

#### 18. Selagem da Aeronave.

A selagem tem como objetivo impedir a inclusão de água, poeiras/sujidade e animais nas extremidades e aberturas das aeronaves:

- ✓ Selar todas as aberturas em que seja possível a inclusão de água, poeiras/sujidade ou animais com o material **A-A-59135**;
- ✓ Colocar as proteções nos tubos de pitot e perfurar, estas proteções, no ponto mais inferior (dreno);
- ✓ Ventilar o sistema de combustível, deixando abertos os pontos de ventilação;
  - Caso a localização dos pontos de ventilação sejam propensas à inclusão de água, poeiras/sujidade ou animais, instalar extensões de tubagens.
- ✓ Antenas deverão ser revestidas com o solvente à prova de água do tipo cera **MIL-W-18723**;
- ✓ Antes da selagem dos motores:
  - Colocar dissecante **MIL-D-3464 Type I** nas entradas de ar e tubagens de escape, de acordo com a fórmula  $U = 5KV$ ;
  - Colocar metade da quantidade de dissecante calculada em recipientes de borracha, tanto nas entradas de ar como nas tubagens de escape.

Nota: U (quantidade de dissecante); K = 0,0007; V (volume da cavidade de entrada de ar em polegadas cúbicas).

- ✓ Prevenindo a entrada de água, selar todos os acessos ao interior dos motores, incluindo as entradas de ar e tubagens de escape:
  - Acessos com menos de 2,5 cm – aplicar a fita **SAE MAS-T-22085 Type II**;
  - Acessos com mais de 2,5 cm – utilizar o material de enchimento **MIL-PRF-131 Class 3** e aplicar a fita **SAE MAS-T-22085 Type II** para fixar o material de enchimento.

Nota: Poderá ser utilizado outro material rígido que servia de enchimento.

- ✓ Fechar todos os drenos.

#### 19. Armazenamento de Longa Duração para Motores.

Segundo a publicação da SAFRAN Snecma “General BMECG-10 Larzac 04 C20 Turbofan Engine: Maintenance Manual” de dezembro de 1984 e atualizado em julho de 2010, o armazenamento de longa duração dos motores que equipam as aeronaves Alpha Jet, mais de 6 meses, o mais equivalente com a preservação Type 1500, caso seja feita exteriormente às aeronaves, será de acordo com os seguintes passos:

- ✓ Os motores deverão ser armazenados, cuidadosamente, em contentores do tipo *SMAA / 010002* ou do tipo *399-004-502-0*;
- ✓ Colocar sacos de dissecante (*AIR 8060* ou *utilizar a sílica MIL-D-3464 Type I*), dentro de cada contentor:
  - 15 Sacos de dissecante no interior do contentor *SMAA010002*;
  - 20 Sacos de dissecante no interior do contentor *399-004-502-0*;
- ✓ Abrir os bocais de ventilação;
- ✓ Fornecer azoto gasoso ao interior dos contentores, através da válvula de pressurização, com uma pressão abaixo dos 0.7 bar;
- ✓ Fornecimento do azoto gasoso deverá levar cerca de 15 minutos, até que o higrómetro esteja nos 20% de humidade relativa;
- ✓ Fechar os bocais de ventilação;
- ✓ Fornecer azoto gasoso ou ar desidratado ao interior dos contentores, através da válvula de pressurização, com uma pressão abaixo dos 0.7 bar, até que a pressão no interior dos contentores seja de acordo com a temperatura ambiente e pressão atmosférica local (ver manómetro de pressão do contentor).

*Nota:* A pressão no interior do contentor deverá ser obtida no gráfico PL. 8, do manual em questão. Serão necessárias a temperatura ambiente ( $T_o$ ) e pressão atmosférica ( $P_o$ ) locais.

O armazenamento, de longa duração, de motores deverá seguir a seguinte frequência de inspeção: 7 dias - 1º mês - 6º mês – 12º mês (seguindo a frequência de 6 em 6 meses).

Em cada inspeção, seguir os seguintes passos:

- ✓ Verificar no manómetro de pressão, a pressão no interior dos contentores;
- ✓ Compensar a pressão interior dos contentores, de acordo com o gráfico PL. 2, utilizando a temperatura ambiente ( $T_o$ ) e pressão atmosférica ( $P_o$ );
- ✓ Verificar no higrómetro, a humidade relativa no interior dos contentores;
- ✓ A humidade relativa não poderá ser maior que 30% (indicador a azul, se for maior que 30% de humidade relativa);
- ✓ Se for maior que 30% de humidade relativa, os contentores deverão ser abertos e os sacos de sílica substituídos (*AIR 8060*), no interior dos mesmos.

## 20. Aeronave em Segurança.

Após a aeronave se encontrar no local final de armazenamento, deverão ser colocá-las em segurança da seguinte forma:

- ✓ As superfícies de controlo de voo (ailerons, flaps, leme de profundidade e leme vertical) deverão estar seguras, no mínimo, com um batente;

*Nota:* Os flaps deverão estar na posição UP (retraídos).

- ✓ Os speed brakes deverão estar retraídos (não atuados);
- ✓ Após estacionar as aeronaves, descarregar os amortecedores do trem de aterragem principal e trem de nariz, cerca 2,5 cm a 7,6 cm;
- ✓ Espaçar as aeronaves umas das outras, de modo a que não ocorra contato entre elas no caso de descarregamento/deflação total dos amortecedores dos trens de nariz e principais.

A Tabela B.1 é ilustrada a listagem do planeamento de preservação a efetuar, para as cinco aeronaves ainda operacionais e mais outras três aeronaves que saíram de operação à relativamente pouco tempo, e o custo da aplicação deste planeamento de preservação, que rondará os 11 mil Dólares. De referir que os preços e as quantidades foram estimados, com base na experiência do investigador, podendo haver desvios no valor final.

Tabela B. 1 – Listagem e preço do planeamento de preservação Alpha Jet

Área de Aplicação	Referência	Embalagem	Preço (\$ -Dólares)	QTY	Total (\$-Dólares)
Aeronave	MIL-PRF-85570	15 Galões = 57 Litros	322	1	322
		5 Galões = 19 Litros	102	1	102
Motores	MIL-PRF-680 SOLVENT DEGREASING TYPE II	5 Galões = 19 Litros	185	1	185
Superfícies Metálicas Expostas Compostos Limpeza	MIL-PRF-81322 GREASE AIRCRAFT GENERAL PURPOSE	6,5 LB (3 Kg)	40	1	40
Revestimento de Equipamentos Eletrónicos/Elétricos	A-A-3174	32 EA (Sacos Plástico)	125	15	1875
Cabos de Aço, Tirantes e Bellcranks	MIL-PRF-680 SOLVENT DEGREASING TYPE II	5 Galões = 19 Litros	185	0	0
Cockpits	MIL-PRF-680 TYPE I	15 Galões = 57 Litros	323	2	646
Superfícies Aço Expostas	MIL-PRF-16173 Grade2	5 Litros	9	1	9
Dobradiças	MIL-PRF-81309 Type II	1 Galão = 3,7 Litros	32	1	32
Flaps	MIL-PRF-81322 GREASE AIRCRAFT GENERAL PURPOSE	6,5 LB (3 Kg)	40	1	40
Selagem Aberturas Exteriores	MIL-PRF-131 Class 3	Rolo de 183 Metros	202	1	202
	SAE-AMS-T-22085 Type II ou MIL-T-22085	Rolo de 33 Metros	15	2	30
	MIL-PRF-16173 Grade 1 (Opcional)	1 Galão = 3,7 Litros	34	2	68
Proteção Pintura	MIL-PRF-6799 Type II	5 Galões = 19 Litros	714	1	714
Materiais Compósitos	MIL-PRF-131 Class 3	Rolo de 183 Metros	202	1	202
	SAE-AMS-T-22085 Type II	Rolo de 33 Metros	15	2	30
Baterias	PETROLATUM VV-P-236	3 Litros	18	1	18
	MIL-PRF-121 Class 1 Grade A Type I	Rolo de 91 Metros	317	1	317
	SAE-AMS-T-22085 Type II	Rolo de 33 Metros	15	1	15
	MIL-PRF-85570 Type II	5 Galões = 19 Litros	102	0	0
	MIL-PRF-81309 Type II	1 Galão = 3,7 Litros	32	0	0
Conectores	MIL-PRF-121 Class 1 Grade A Type I	Rolo de 91 Metros	317	2	634
	SAE-AMS-T-22085 Type II	Rolo de 33 Metros	15	2	30
	MIL-PRF-16173 Grade 1 (Opcional)	1 Galão = 3,7 Litros	34	0	0
Luzes	MIL-PRF-6799 Type II	5 Galões = 19 Litros	714	0	0
Aviônicos	MIL-PRF-85570 Type II	5 Galões = 19 Litros	102	1	102
	MIL-D-16791 Type I	5 Galões = 19 Litros	137	0	0
Sistema de Combustível	MIL-PRF-6081 Grade 1010	1 Galão = 3,7 Litros	7	80	560

Atuadores	MIL-PRF-680 SOLVENT DEGREASING TYPE II	5 Galões = 19 Litros	185	1	185
Sistemas Parcialmente Desmontados	MIL-PRF-131 Class 3	Rolo de 183 Metros	202	1	202
	SAE-AMS-T-22085 Type II	Rolo de 33 Metros	15	2	30
Amortecedores	MIL-PRF-680 SOLVENT DEGREASING Type II	5 Galões = 19 Litros	185	0	0
	MIL-PRF-16173 Grade 1	1 Galão = 3,7 Litros	34	1	34
Rolamentos e Anéis	MIL-PRF-680 SOLVENT DEGREASING Type II	5 Galões = 19 Litros	185	0	0
	MIL-PRF-81322 GREASE AIRCRAFT GENERAL PURPOSE	6,5 LB (3 Kg)	40	1	40
Atuadores das Portas de Trem	MIL-PRF-680 SOLVENT DEGREASING Type II	5 Galões = 19 Litros	185	0	0
Macacos Bloqueadores de Trem	MIL-PRF-16173 Grade 2	5 Litros	9	1	9
Canopys e Superfícies de Plástico	MIL-D-16791 Type 1	5 Galões = 19 Litros	137	0	0
	MIL-PRF-680 SOLVENT DEGREASING TYPE II	5 Galões = 19 Litros	185	1	185
	MIL-PRF-6799 Type II	5 Galões = 19 Litros	714	1	714
Converters	A-A-59503 Type I Class 1	Azoto Gasoso utilizado pela Secção			
Reguladores de Oxigénio	MIL-PRF-121 Class 1 Grade A Type 1	Rolo de 91 Metros	317	2	634
	SAE-AMS-T-22085 Type II	Rolo de 33 Metros	15	2	30
Válvulas Anti-G e Reguladoras de Pressão	MIL-PRF-121 Class 1 Grade A Type 1	Rolo de 91 Metros	317	0	0
	SAE-AMS-T-22085 Type II	Rolo de 33 Metros	15	0	0
Difusores	MIL-PRF-131 Class 3	Rolo de 183 Metros	202	0	0
	SAE-AMS-T-22085 Type II	Rolo de 33 Metros	15	1	15
Motores	Óleo Sintético p/ Motor VISC.5CST, CLASS STD	Utilizado pela Secção			
	BRAYCO 599	236 Mililitros	27	12	324
	MIL-PRF-6081 Grade 1010	1 Galão = 3,7 Litros	7	12	84
Aeronave	A-A-59135	137 Metros	415	3	1245
Antenas	MIL-W-18723	1 EA	184	1	184
Motores	MIL-D-3464 Type I	450 EA	152	2	304
	SAE-AMS-T-22085 Type II	Rolo de 33 Metros	15	2	30
	MIL-PRF-131 Class 3	Rolo de 183 Metros	202	1	202
	SMAA / 010002 (opção)	Contentor	Existente na secção		0
	399-004-502-0 (opção)	Contentor	Existente na secção		0
	AIR 8060	dissecante (sílica)			0
<b>Valor Total (\$ - Dólares)</b>					<b>10975</b>