



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Mecânica



Avaliação e Gestão da Fiabilidade em Manutenção

MARCO ANTERO AFONSO DOS SANTOS
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientador:

Doutor Vítor Manuel Rodrigues Anes

Júri:

Presidente: Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes

Vogais:

Doutor António João Pina da Costa Feliciano Abreu

Doutor Vítor Manuel Rodrigues Anes

Novembro de 2023



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Mecânica

Avaliação e Gestão da Fiabilidade em Manutenção

MARCO ANTERO AFONSO DOS SANTOS
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientador:

Doutor Vítor Manuel Rodrigues Anes

Júri:

Presidente: Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes

Vogais:

Doutor António João Pina da Costa Feliciano Abreu

Doutor Vítor Manuel Rodrigues Anes

Novembro de 2023

Agradecimentos

Ao meu irmão, que me acompanhou em todos os momentos da vida, desde a nascença até aos dias de hoje, desde os momentos de disciplinas, dedicação, esforço e abnegação até aos momentos de conquista e glória.

Aos meus pais, pela educação e persistência que fizeram de mim o homem que sou hoje e, acima de tudo, pelo património educacional, emocional e cultural que me transmitiram e que é a minha maior herança.

À minha namorada pela motivação e dedicação. Pelo apoio em todas as minhas jornadas, loucuras e momentos difíceis. Pela companhia nos momentos bons e marcos da minha vida académica e profissional que, no final de contas, se reflete na minha vida pessoal.

À minha família, amigos e camaradas, pelas palavras de apreço e motivação que permite ganhar forças para alcançar mais e melhor. Por todas as experiências e expectativas que me permitiram carregar e fizeram alcançar sempre mais.

Ao meu orientador, pelo acompanhamento, conselho e carinho transmitido ao longo deste árduo trabalho, que permitiu alcançar o objetivo que me propus.

Por Portugal.

"Sonhos sem metas são apenas sonhos e, eventualmente, geram frustração. Na jornada para alcançar os seus sonhos você deve aplicar disciplina e, mais importante, consistência. Porque sem comprometimento você nunca começa, mas sem consistência você nunca termina." - Denzel Washington

Sorte é quando a oportunidade se encontra com a preparação (Adaptado de Sêneca)

“Semper Fidelis, Semper Paratus”

Resumo

A dinâmica mundial pressiona cada vez mais a implementação de políticas de manutenção adequadas que permitam uma rápida e organizada resposta às necessidades organizacionais. A escassez de recurso, as limitações dos recursos humanos, elevada procura e pouca capacidade de resposta, diferentes e variadas vias logísticas são fatores modernos que podem influenciar diretamente um processo de manutenção. A manutenção tem de conseguir dar resposta a todas estas adversidades mantendo os seus equipamentos operacionais e disponíveis por forma a manter a organização competitiva no ambiente onde esta inserido.

Deste modo, é necessário utilizar ferramentas, métodos e filosofias de manutenção que permitam responder a todas as carências, através dos recursos existentes, de forma eficiente e eficaz. Assim, a *Failure Reporting, Analysis and Corrective Action Systems* (FRACAS) apresenta-se como uma metodologia moderna que responde, na prática, às necessidades de manutenção de uma dada organização. Esta, devido ao seu cariz prático apresenta limitações na sua utilização nomeadamente no setor operacional, de planeamento, coordenação e logístico.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo identificar as limitações que a metodologia FRACAS apresenta e desenvolver uma abordagem estruturada na avaliação e gestão da fiabilidade em manutenção. Neste âmbito, foi feito recurso à filosofia *Reliability Centered Maintenance* (RCM) e política de manutenção *Condition Based Maintenance* (CBM), que sustentam a base do desenvolvimento da gestão da manutenção e fiabilidade da metodologia.

Foi realizada a demonstração da metodologia proposta com recurso as bases analíticas da gestão da manutenção e da fiabilidade. Ainda, foi feita, através de modelos numéricos, uma comparação teórica entre o desempenho da metodologia convencional e a metodologia proposta. Esta aplicação permitiu retirar, teoricamente, importantes ilações que permitem sustentar o modelo proposto, bem como, o incremento da eficiência e eficácia na gestão da fiabilidade.

Palavras-Chave: *Failure Reporting, Analysis and Corrective Action Systems*, Manutenção, Fiabilidade, *Reliability Centered Maintenance*, *Condition Based Maintenance*

Abstract

Global dynamics are putting increasing pressure on the implementation of appropriate maintenance policies that enable a rapid and organised response to organisational needs. Resource scarcity, human resource limitations, high demand and low response capacity, different and varied logistical routes are all modern factors that can directly influence a maintenance process. Maintenance has to be able to respond to all these adversities by keeping its equipment operational and available in order to keep the organisation competitive in its environment.

It is therefore necessary to use maintenance tools, methods and philosophies that enable all the shortcomings to be met efficiently and effectively using existing resources. Failure Reporting, Analysis and Corrective Action Systems (FRACAS) is a modern methodology that responds in practice to the maintenance needs of a given organisation. Due to its practical nature, it has limitations in its use, particularly in the operational, planning, coordination and logistics sectors.

The aim of this study is therefore to identify the limitations of the FRACAS methodology and to develop a structured approach to assessing and managing reliability in maintenance. In this context, recourse was made to the Reliability Centred Maintenance (RCM) philosophy and the Condition Based Maintenance (CBM) maintenance policy, which underpin the development of the methodology's maintenance and reliability management.

The proposed methodology was demonstrated using the analytical bases of maintenance and reliability management. A theoretical comparison between the performance of the conventional methodology and the proposed methodology was also made using numerical models. This application made it possible to theoretically draw important conclusions that support the proposed model, as well as increasing efficiency and effectiveness in reliability management.

Keywords: Failure Reporting, Analysis and Corrective Action Systems, Maintenance, Reliability, Reliability Centered Maintenance, Condition Based Maintenance

Índice

| | |
|--|-------------|
| Agradecimentos | v |
| Resumo | ix |
| Abstract | xi |
| Índice | xiii |
| Índice de Figuras | xvi |
| Índice de Tabelas | xix |
| Lista de Siglas, Símbolos e Acrónimos | xxi |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Motivação e Contextualização da Dissertação | 2 |
| 1.2 Objetivos e Metodologias..... | 4 |
| 1.2.1 Perguntas de investigação..... | 5 |
| 1.3 Organização da Dissertação | 5 |
| 2 Revisão da literatura | 7 |
| 2.1 Failure Reporting, Analysis and Corrective Action | 7 |
| 2.1.1 Conceito Geral | 7 |
| 2.1.2 Processo Failure Reporting, Analysis and Corrective Action | 9 |
| 2.1.3 Sistema de comunicação de falha | 13 |
| 2.1.4 Recolha e documentação de dados | 15 |
| 2.1.5 Análise de falha | 18 |
| 2.1.6 Ação corretiva e procedimentos de encerramento do processo..... | 19 |
| 2.1.7 Conselho de revisão de falhas | 20 |
| 2.1.8 Planeamento e modelos do processo de FRACAS | 22 |
| 2.1.9 Limitações do processo FRACA | 23 |
| 2.2 Manutenção e gestão da manutenção | 26 |
| 2.2.1 Enquadramento e conceitos da manutenção | 26 |
| 2.2.2 Modelos da manutenção | 28 |
| 2.2.3 Teoria da Manutenção | 33 |
| 2.2.4 Indicadores de desempenho da manutenção..... | 37 |
| 2.2.5 Níveis da manutenção..... | 38 |
| 2.2.6 Gestão da manutenção | 40 |
| 2.3 Fiabilidade na manutenção..... | 43 |
| 2.3.1 Teoria da fiabilidade | 43 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 2.3.2 | Indicadores de desempenho da fiabilidade | 48 |
| 2.3.3 | Metodologias que visam a melhoria da fiabilidade operacional | 50 |
| 2.4 | <i>Reliability Centered Manintenance</i> (RCM) | 51 |
| 2.4.1 | Enquadramento da filosofia RCM..... | 51 |
| 2.4.2 | Tipos RCM | 54 |
| 2.4.3 | Fundamentos do RCM..... | 56 |
| 2.4.4 | Implementação do RCM..... | 58 |
| 2.4.5 | Falha | 59 |
| 2.4.6 | Failure Mode and Effects Analysis e Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis 62 | |
| 2.4.7 | Árvore de falhas..... | 66 |
| 2.5 | Bestsourcing | 68 |
| 2.6 | Manutenção baseada na condição (CBM)..... | 71 |
| 3 | Proposta de melhoria do modelo FRACAS | 75 |
| 3.1 | Contexto | 75 |
| 3.2 | Interação organizacional eficiente..... | 76 |
| 3.3 | Identificação das falhas e rastreio dos dados | 79 |
| 3.4 | Órgão de direção técnica | 83 |
| 3.4.1 | Priorização dos objetivos..... | 86 |
| 3.4.2 | Flexibilidade logística | 93 |
| 3.5 | Modelo FRACAS proposto..... | 95 |
| 4 | Validação do modelo..... | 100 |
| 4.1 | Comparação do modelo proposto com o modelo convencional | 100 |
| 4.1.1 | Identificação da falha, relato de falhas e recolha de dados | 101 |
| 4.1.2 | Análise de Causa Raiz e definição de ações corretivas | 105 |
| 4.1.3 | Definição de prioridades e implementação das ações de manutenção ... | 107 |
| 5 | Conclusão..... | 109 |
| 5.1 | Trabalhos Futuros..... | 111 |
| | Referências | 113 |
| | Anexo A | 119 |
| | Anexo B..... | 120 |
| | Anexo C | 121 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - FRACAS de circuito fechado (Fonte: Department of Defense, 1998)..... | 10 |
| Figura 2 - Formulário do relatório de falhas (Fonte: Department of Defense, 1998) | 14 |
| Figura 3 - FRACAS de circuito fechado com FBR (Fonte: Department of Defense, 1998) | 21 |
| Figura 4 - Fluxograma do processo FRACAS da empresa Metrolinx (Fonte: Metrolinx, 2020)..... | 23 |
| Figura 5 - Tipos de manutenção (Fonte: Adaptado do Instituto Português da Qualidade, 2007)..... | 29 |
| Figura 6 - Esquema de manutenção preventiva sistemática (Fonte: Filipe, 2003)..... | 31 |
| Figura 7 - Curva P-F e períodos de manutenção preventiva condicionada (Fonte: Adaptado de Teles, 2017)..... | 32 |
| Figura 8 - Principais objetivos da manutenção (Fonte: Pinto, 2013) | 34 |
| Figura 9 - Relação entre custos diretos e indiretos da manutenção (Fonte: Canuto, 2009) | 35 |
| Figura 10 - Relação entre custos da manutenção e de avarias (Fonte: Canuto, 2009) ... | 35 |
| Figura 11 - Custo total da manutenção em função da manutenção preventiva e corretiva (Fonte: Stevenson, 2002)..... | 36 |
| Figura 12 - Inter-relação entre disponibilidade e lucro (Fonte: Canuto, 2009)..... | 36 |
| Figura 13 - Sistema estrutural de objetivos (Fonte: Neves, 2012) | 38 |
| Figura 14 - Relação antagónica entre a fiabilidade e a probabilidade de falha (Fonte: Placca, 2017) | 45 |
| Figura 15 - Relação entre a densidade de probabilidade de falha e o tempo | 46 |
| Figura 16 - Influência de alguns fatores na taxa de avarias (Fonte: Sobral, 2010) | 47 |
| Figura 17 - Taxa de falha de 3 equipamentos distintos (Fonte: Placca, 2017)..... | 47 |
| Figura 18 - Esquematização dos indicadores de desempenho..... | 49 |
| Figura 19 - Exemplo dos estados de funcionamento (Fonte: Pinto, 2013)..... | 50 |
| Figura 20 - Processo RCM (Fonte: Adaptado NASA, 2008)..... | 54 |
| Figura 21 - RCM linhas orientadoras/ Árvore logica (Fonte: Adaptado NASA, 2008). 57 | |
| Figura 22 - Padrões de probabilidade de falha condicional em função da idade operacional de um ativo (Fonte: Adaptado de NASA, 2008) | 61 |
| Figura 23 - Simbologia e nomenclatura da árvore de falhas (Fonte: Sobral, 2010)..... | 67 |

| | |
|---|-----|
| Figura 24 - Matriz de decisão de fonte de fornecimento (Fonte: adaptado de Dunn, 2015) | 70 |
| Figura 25 - Gráfico de detecção da degradação da análise de controlo de condição (Fonte: NASA, 2008) | 72 |
| Figura 26 - Flutuação da condição de funcionamento de um equipamento em CBM (Fonte: Monchy, 2003) | 74 |
| Figura 27 - Mapeamento da identificação da falha do FRACAS | 77 |
| Figura 28 - Fase I do FRACAS convencional (Fonte: Adaptado de MIL-HDBK-338B, 1988) | 80 |
| Figura 29 - Esquematização do CBM dos equipamentos do FRACAS | 82 |
| Figura 30 - Fase II e ODT do FRACAS (Fonte: Adaptado de MIL-HDBK-338B, 1988) | 83 |
| Figura 31 - Composição do ODT | 84 |
| Figura 32 - Modelo de decisão das prioridades na manutenção (2 fatores) | 87 |
| Figura 33 - Exemplo FMECA (Fonte: Jesus, 2021) | 91 |
| Figura 34 - Fator urgência/criticidade em função da análise de condição (Fonte: Adaptado de NASA, 2008) | 91 |
| Figura 35 - Modelo de FRACAS proposto | 98 |
| Figura 36 - Fase da identificação da falha, relato de falhas e coleta de dados (Fase I): a) modelo proposto; b) modelo convencional | 101 |
| Figura 37 - Fase I – Impacto nos indicadores de desempenho | 102 |
| Figura 38 - Fase da Análise de causa raiz e definição de ações corretivas (Fase II) do modelo proposto | 105 |
| Figura 39 - Fase II – Impacto nos indicadores de desempenho | 106 |

Índice de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1- Métodos de fiabilidade populares e respetiva pontuação normalizada (Fonte: Adaptado de Loll, 2008; Cricimagna, 1995) | 3 |
| Tabela 2 - Composição do processo FRACAS (Fonte: Adaptado de Lee et. al., 2010) | 12 |
| Tabela 3 - Níveis de manutenção (Fonte: Adaptado de AFNOR, 2002)..... | 39 |
| Tabela 4 - Quadro com os critérios do fator de severidade – RPN (Fonte: Adaptado de NASA, 2008)..... | 64 |
| Tabela 5 - Quadro com os critérios do fator de ocorrência – RPN (Fonte: Adaptado de Department of Defense, 1998)..... | 64 |
| Tabela 6 - Quadro com os critérios do fator de deteção – RPN (Fonte: Adaptado de Department of Defense, 1988)..... | 65 |
| Tabela 7 - Processo de decisão na adjudicação de serviços (Fonte: Canuto, 2009)..... | 71 |
| Tabela 8 - Aplicação PT&I (Fonte: Adaptado de NASA, 2008)..... | 74 |
| Tabela 9 - Comparação de características de implementação das ferramentas apresentadas (MP, SOP e CMMS)..... | 79 |
| Tabela 10 - Características na implementação do CBM | 81 |
| Tabela 11 - Coeficiente dos fatores de ponderação | 89 |
| Tabela 12 - Importância estratégica | 89 |
| Tabela 13 - Urgência de reparação ou Criticidade | 89 |
| Tabela 14 - Impacto económico | 90 |
| Tabela 15 - Classificação da criticidade (Fonte: Adaptado de Ford Motor Company, 1995) | 90 |
| Tabela 16 - NPE e classificação da prioridade de manutenção | 92 |
| Tabela 17 - Modelo de decisão das prioridades na manutenção (3 fatores)..... | 93 |
| Tabela 18 - Modelo de decisão de fontes logísticas | 95 |
| Tabela 19 - Detalhes do modelo FRACAS proposto | 99 |

Lista de Siglas, Símbolos e Acrónimos

AENOR - *Asociación Española de Normalización y Certificación*;
AFNOR - *Association Française de Normalisation*;
CA - *Criticality Analysis*;
CAR - *Corrective Action Request*;
CBM - *Condition Based Maintenance*;
CEO - *Chief Executive Officer*;
CMMS - *Computerized Maintenance Management System*;
D - *Deteção*;
Disp - *Disponibilidade*;
DRACA - *Data Reporting, Analysis and Corrective Action*
DRACAS - *Data Reporting, Analysis and Corrective Action Systems*
DoD - *Department of Defense*
DOM – *Design-Out Maintenance*;
EN - *European Norm* (Norma Europeia)
EPRI - *Electric Power Research Institute*;
F - *Probabilidade de falha*;
f - *Função densidade de probabilidade de falha*;
FBR - *Failure Review Board* (Conselho de Revisão de Falha);
FBM - *Failure Based Maintenance*;
FMEA - *Failure Mode and Effect Analysis*;
FMECA - *Failure Mode, Effect and Criticality Analysis*;
FRACA - *Failure Reporting, Analysis and Corrective Action*;
FRACAS - *Failure Reporting, Analysis and Corrective Action Systems*;
FTA - *Fault Tree Analysis*;
IA - *Inteligência Artificial*;
ICD - *Indicadores Chave de Desempenho*;
IPQ - *Instituto Português da Qualidade*;
ISO - *International Organization for Standardization*;
KPI - *Key Performance Indicator*;
LCC - *Life-Cycle Cost*;
MDT - *Mean Down Time*;
MIL-STD - *Military Standard* (Norma Militar);

MODUK - *British Defense Standards*;
MP - Mapeamento de processos;
MTBF - *Mean Time Between Failures*;
MTTR - *Mean Time To Repair*;
MWT - *Mean Waiting Time*;
NASA - *National Aeronautics and Space Administration*;
NP - Norma Portuguesa;
NPE - Número Prioritário Estratégico;
NPR - Número de Prioritário de Risco;
O - Ocorrência;
ODT - Órgão de Decisão Técnica;
OEE - *Overall Equipment Effectiveness*;
PM - *Preventive Maintenance*;
PT&I - *Predictive Testing and Inspection*;
R - *Reliability* (Fiabilidade);
RAMS - *Reliability, Availability, Maintainability and Safety*;
RBI - *Reliability Based Inspection*;
RCM - *Reliability Centered Maintenance*;
ROM - *Results Oriented Maintenance*;
RPN - *Priority Risk Number*;
S - Severidade;
SAE - *Society of Automotive Engineers*;
SOP - *Standing Operating Procedure*;
TI - Tecnologias de Informação;
TPM - *Total Productive Maintenance* (Manutenção Produtiva Total);
UBM/TBM - *Use or Time Based Maintenance*;
USNavy - *United States Navy*;
UNE - Normalización Española (Norma Espanhola);
 λ - Taxa de falha.

1 Introdução

A manutenção apresenta-se como um pilar predominante de qualquer organização industrial, que corresponde a um conjunto de operações que têm como principal objetivo garantir o normal funcionamento dos equipamentos e evitar que ocorram avarias que possam provocar a diminuição funcional destes e, conseqüentemente, do rendimento da empresa.

Atualmente, a indústria não atribui a esta área de ação a importância real que lhe deveria ser concedida. No entanto, com o passar dos anos, a manutenção tem adquirido um maior destaque, através dos diversos estudos que comprovam a existência de uma estreita relação com fatores influenciadores das economias industriais. Na prática, foi esta relação que impulsionou uma exponencial pesquisa e estudo sobre a manutenção e as diversas formas de a realizar.

Deste modo, a evolução da manutenção apresenta-se na história de duas formas distintas (Pereira et al., 1996):

1. O modelo de manutenção evoluiu com o aparecimento dos diferentes tipos de manutenção e a sua interação;
2. A evolução da manutenção com gênese na ação de manutenção que só tem início após a decisão de investimento.

De uma forma geral, as empresas apresentam dificuldade na aplicação das próprias estratégias de melhorias nos processos internos (Maleye, 2006). Este facto, aliado à incapacidade de visualizar resultados económicos a curto prazo e manipulação de fatores operacionais, que a visão estratégica identifica como prioritários na aplicação económica, tornam a implementação dos modelos de manutenção ineficaz e ineficiente.

A identificação precoce de anomalias e falhas é imperativo para o regular funcionamento dos equipamentos que, na prática, se traduz na fonte de rendimento e produção das organizações. A identificação da causa raiz e a rápida implementação das ações corretivas são a base de uma resposta eficiente e eficaz na manutenção industrial. Assim, o sistema *Failure Reporting, Analysis and Corrective Action* (FRACAS) apresenta-se como uma tecnologia de vanguarda que identifica as causas raízes e, através de processos internos, determina as ações corretivas para a resolução dos problemas. Aliás, conforme destacam Whaling e Kemp (2004), o FRACAS é um conceito teórico de um serviço interno que permite registar todos os tipos de anomalias e, através dos

procedimentos funcionais da metodologia, permite reduzir os custos a curto prazo e melhorar a qualidade a longo prazo.

No seio da manutenção, a fiabilidade dos produtos ou serviços é reconhecida como um fator-chave para a competitividade de uma empresa. A fiabilidade refere-se à capacidade de um sistema ou de um componente desempenhar as funções requeridas nas condições estabelecidas durante um determinado período. Na engenharia de fiabilidade é importante recolher e analisar a informação relacionada com as diversas fases, desenvolvimento, testes, produção e operação (Lee et al., 2010).

Normalmente, a gestão do FRACAS tem duas perspetivas principais. Por um lado, a informação relacionada com a fiabilidade e as tarefas operacionais e, por outro lado, a informação que inclui dados de campo, relatórios de falhas, especificações de produtos ou peças e perfis de engenheiros relacionados. De acordo com Lee et al. (2010), forma como o FRACAS será conduzido está relacionada com determinados elementos, tais como, procedimentos de trabalho, fluxos de trabalho, regulamentos, proprietários, responsabilidades e estruturas organizacionais. Na prática, são estes elementos que conduzem à gestão do processo FRACAS e influenciam diretamente na fiabilidade do processo, que se apresenta como objetivo a alcançar no recurso a esta metodologia.

Por fim, o FRACAS apresenta-se como uma metodologia bastante poderosa na área de manutenção que, através de um carácter extremamente prático, obriga a um grande envolvimento e coordenação dos responsáveis da manutenção. De facto, devido ao seu carácter de aplicação interna, o FRACAS apresenta limitações na sua utilização. Assim, a presente dissertação centra-se na exploração de todas as limitações que a metodologia apresenta e na agregação de métodos e ferramentas que permitam uma aplicação intuitiva e eficaz para facilitar a sua implementação organizacional.

1.1 Motivação e Contextualização da Dissertação

O FRACAS é uma metodologia bastante comum nas indústrias tecnologicamente avançadas e envolve muitas funções e diferentes papéis numa dada organização (Lee et al., 2010). Aliás, ao longo dos anos, o sistema FRACAS alcançou uma posição privilegiada no seio dos métodos de análise de fiabilidade. De acordo com Panchangam e Naikan (2012), o FRACAS é a metodologia que é mais utilizado para análise de fiabilidade e, uma vez que a comunidade científica tem a necessidade de mensurar e quantificar tudo, existem diversos estudos que o comprovam.

Neste sentido, foi feita uma análise por Loll (2008) e Criscimagna (1995) de todos os métodos de fiabilidade populares para análise da produção de produtos e, verificou-se que, o FRACAS tem uma pontuação normalizada elevada (88.3). A pontuação descrita neste estudo, baseia-se nos dados dos inquéritos realizados em indústrias sobre várias técnicas utilizadas por estas, para melhorar a fiabilidade e análise de falhas. A tabela 1 ilustra as diversas técnicas populares supramencionadas e a sua pontuação normalizada.

Tabela 1- Métodos de fiabilidade populares e respetiva pontuação normalizada (Fonte: Adaptado de Loll, 2008; Criscimagna, 1995)

| Posição | Método | Pontuação Normalizada |
|----------------|--------------------------------------|------------------------------|
| 1 | FRACAS | 88.3 |
| 2 | Revisão de Design | 83.8 |
| 3 | Controle de subcontratados | 72.1 |
| 4 | Controlo de peças | 71.2 |
| 5 | Teste de qualificação da fiabilidade | 70.3 |
| 6 | FMEA | 68.5 |
| 7 | Previsão | 62.2 |
| 8 | TAAF | 59.5 |
| 9 | Análise térmica | 58.6 |

Ligado à sua ampla utilização e carácter prático advém um conjunto de limitações, o que significa que há uma série de problemas associados a esta metodologia que podem ser otimizados. Na verdade, o FRACAS depende de um conjunto de variáveis, onde o fator humano é o elemento predominante, o que aumenta a necessidade de coordenação interna e gestão eficiente dos procedimentos e processos que influenciam diretamente a eficiência e eficácia do processo.

Por outro lado, o sector recente exige uma gestão mais eficaz do FRACAS em termos das suas funções e operações. Os ambientes empresariais estão a mudar, migrando para um ecossistema mais exigente e competitivo, onde as operações são realizadas em grande escala e os ambientes são globalmente localizados e distribuídos (Lee et al., 2010).

Em resumo, uma vez que o FRACAS se define como um processo empresarial, pode ser desenvolvido com base num conceito orientado para o processo (especialmente centrado na implementação do seu ciclo fechado). Sendo um sistema fechado terá de ser analisado, individualmente e sectorialmente, por forma a integrar as ferramentas de gestão de processo, a fim de aumentar a eficiência da metodologia FRACAS.

1.2 Objetivos e Metodologias

A investigação existente sobre o FRACAS centra-se principalmente nos diferentes aspetos da teoria em si, e não na forma de melhorar a sua aplicação utilizando as estratégias de melhoria existentes. De acordo com Lee et al. (2010), existe um défice de investigação no que respeita a metodologia FRACAS e, por outro lado, existe muita investigação sobre o serviço interno e o serviço *lean* que, na prática, são os dois conceitos que contribuem para compreender as causas dos problemas no processo do Pedido de Ação Corretiva (CAR).

O objetivo da presente dissertação assenta na melhoria da metodologia FRACAS. Assim, os objetivos operacionais definidos para a presente dissertação são os seguintes:

- Analisar e identificar as limitações na metodologia FRACAS;
- Ultrapassar as limitações encontradas na metodologia FRACAS;
- Desenvolver uma abordagem estruturada na avaliação e gestão da fiabilidade em manutenção usando a FRACAS;
- Validação do modelo.

O FRACAS foi aprimorado ao longo dos anos, através do recurso à incorporação dos requisitos comerciais e a diversos modelos e abordagens. Uma das abordagens mais importantes e mais utilizada na evolução do FRACAS consiste na normalização das tarefas e processos, isto é, as tarefas típicas e comuns de gestão e análise da fiabilidade são classificadas a partir de documentos padronizados e com credibilidade técnica como as normas MIL, IEC e ANSI. De acordo com Whaling e Kemp (2004), este facto deve-se ao enorme contributo que a normalização apresenta na melhoria da integridade das tarefas do FRACAS em termos da sua data de vencimento e de cada atividade.

Por fim, a abordagem utilizada nesta dissertação consiste em recorrer às normas existentes como base na normalização dos procedimentos, inserindo, também, ferramentas da gestão da manutenção que permitem colmatar lacunas da metodologia. Como já referido, uma vez que, a maior parte do processo FRACAS depende do fator humano, é importante regularizar e normalizar todos os procedimentos do processo, a fim de mitigar lacunas originadas por situações como desconhecimento, incerteza ou falta de sensibilidade do operador.

1.2.1 Perguntas de investigação

Tendo em conta os objetivos operacionais definidos ao longo do subcapítulo anterior, esta tese centra-se nas seguintes questões de investigação:

1. Quais são as limitações que a metodologia *Failure Reporting, Analysis and Corrective Action System* (FRACAS) apresenta.
2. De que forma é possível melhorar ou mitigar os problemas associados à metodologia *Failure Reporting, Analysis and Corrective Action System* (FRACAS).
3. De que forma é possível contruir uma abordagem estruturada na avaliação e gestão da fiabilidade em manutenção.

1.3 Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos onde são desenvolvidos conceitos importantes relativamente à implementação, ilustração, discriminação, validação e conclusões do modelo FRACAS. Assim, a dissertação adota a seguinte estrutura:

- Capítulo 1: permite introduzir a importância da manutenção e enquadramento da metodologia FRACAS que é abordado ao longo da dissertação. Neste capítulo são, ainda, apresentados os objetivos que são propostos alcançar, bem como as perguntas de investigação das quais pretendo obter resposta ao longo dos capítulos que compõem o presente trabalho.
- Capítulo 2: contempla uma revisão da literatura utilizada ao longo da dissertação. Permite ao leitor um enquadramento no tema, bem como, todas as ferramentas e termos utilizados ao longo da dissertação, desde a manutenção, o FRACAS, a gestão da manutenção, a fiabilidade, a filosofia da Manutenção centrada na fiabilidade (RCM) e a manutenção baseada na condição (CBM) e, por fim, ferramentas logísticas. Ainda, neste capítulo, são identificados os problemas que implicam diretamente na eficiência e eficácia do sistema FRACAS.
- Capítulo 3: ilustra as ferramentas selecionadas para colmatar as limitações apresentadas no capítulo 2. Ainda, o presente capítulo esquematiza a integração de todas as ferramentas, métodos e filosofias propostas e

discrimina as etapas do modelo proposto, bem como, as atribuições de responsabilidade, sequência de ação e ferramentas por etapa.

- Capítulo 4: resume as limitações apresentadas e a forma como o modelo proposto as colmata. Ilustra, ainda, uma comparação entre o modelo convencional e o modelo proposto e são apresentadas conclusões teóricas da aplicação do modelo escolhido. Por fim, são feitas sugestões dos trabalhos futuros, bem como, formas de as aplicar de modo convergente com o modelo proposto.
- Capítulo 5: apresenta conclusões extraídas ao longo dos capítulos supramencionados e faz referência aos objetivos alcançados na presente dissertação. Por último, aborda uma conjunto de sugestões para trabalhos futuros que possam contribuir para um desenvolvimento da metodologia FRACAS.

2 Revisão da literatura

O presente capítulo ilustra uma breve revisão bibliográfica relativa ao sistema *Failure Reporting, Analysis and Corrective Action*, a avaliação e gestão da fiabilidade e uma breve descrição de conceitos, e teoria e gestão da manutenção. Ainda, serão abordadas as temáticas e conceitos da fiabilidade, gestão e indicadores de desempenho da fiabilidade e da manutenção.

Deste modo, é ainda apresentada a filosofia de manutenção centrada na fiabilidade (RCM), que se tornou um pilar da evolução do modelo proposto na presente dissertação, a ferramenta logística *bestsourcing* e a metodologia da manutenção baseada na condição (CBM), que contribuirá como fator de apoio ao modelo.

Finalmente, de salientar que todos as temáticas descritas e discriminadas servem de suporte científico para o modelo proposto, assim como, os elementos de compreensão de conceitos mais complexos que serão abordados ao longo da dissertação.

2.1 Failure Reporting, Analysis and Corrective Action

2.1.1 Conceito Geral

A metodologia *Failure Reporting, Analysis and Corrective Action* (FRACA) foi normalizada em 1985 pelo departamento de defesa dos Estados Unidos da América (Lee et al., 2010). Esta entidade definiu o modelo FRACA como a comunicação formal das falhas e avarias, a análise das respetivas falhas que é realizada na medida em que a sua causa é compreendida, e as ações corretivas que são identificadas, implementadas e verificadas para evitar que a falha se repita (Department of Defense, 1985).

Relativamente ao conceito, de acordo com o Department of Defense (1998), o *Failure Reporting, Analysis and Corrective Action* é um instrumento de gestão que é utilizado para identificar e corrigir defeitos no equipamento e, desta forma, prevenir a sua ocorrência. Baseia-se na notificação sistemática e análise de falhas durante o fabrico, inspeção, teste e utilização. A característica de ciclo fechado do FRACAS exige que a informação obtida durante a análise de falhas seja divulgada a todos os engenheiros e gestores que tomam decisões no programa.

Qual é o principal objetivo da metodologia FRACA? Na prática, o Department of Defense (1998) responde a essa questão explanando os seguintes objetivos:

- Recolher dados de falhas;

- Fornecer procedimentos para determinar a causa da falha;
- Documentar as medidas corretivas tomadas;

Para cumprir tais objetivos é imperativo que exista um sistema fechado de recolha, análise e registo das falhas. Contribui, também, para o sucesso desta ferramenta a divulgação atempada de informações precisas sobre falhas e avarias para que possam ser imediatamente tomadas medidas corretivas, de modo a evitar a repetição das mesmas.

O modelo FRACA destina-se a providenciar a visibilidade e controlo da gestão para melhoria da fiabilidade, a manutenção dos equipamentos através da utilização oportuna e disciplinada de dados de falha e, ainda, a manutenção para gerar e implementar ações corretivas eficazes, a fim de evitar a recorrência de falhas e simplificar ou reduzir as tarefas de manutenção (Department of Defense, 1985).

Para Villacourt (1992), o objetivo da metodologia FRACA centra-se na capacidade de fornecer dados de engenharia para ações corretivas, avaliar o desempenho histórico de fiabilidade (tempo médio entre falha, tempo médio de recuperação, disponibilidade, etc.), desenvolver padrões para responder a falhas e fornecer dados para análise estatística.

O FRACA é um sistema relativamente moderno, de índole extremamente prática que é considerado um elemento essencial para a realização antecipada da sustentada do potencial de fiabilidade e manutenção. Deste modo, através da identificação e da análise de falhas e avarias e das respetivas ações de manutenção, permite aumentar a eficiência do componente e, sucessivamente, a sua fiabilidade (Department of Defense, 1985).

Por conseguinte, a implementação antecipada da metodologia FRACA é de relevante importância, pois as opções de ação corretiva e a flexibilidade são maiores durante a evolução da fase de produção. Assim, quanto mais cedo forem identificadas as causas de falhas, mais fácil será a implementação de ações corretivas. À medida que a produção do componente amadurece, as ações corretivas ainda podem ser identificadas, mas as opções tornam-se limitadas e a implementação é mais difícil (Department of Defense, 1985).

A comunicação e análise de falha são ações centrais, sensíveis e fulcrais no sistema FRACA e são necessárias para assegurar que a fiabilidade e a manutenção de um produto são alcançadas e sustentadas. O programa FRACAS é um elemento-chave no controlo da "recorrência de falhas", devendo incluir procedimentos para assegurar que as falhas são relatadas com precisão e cuidadosamente analisadas, a fim de serem tomadas

medidas corretivas em tempo útil para reduzir ou prevenir a sua recorrência (Department of Defense, 1998).

2.1.2 Processo Failure Reporting, Analysis and Corrective Action

O processo FRACA é uma metodologia de constante recolha e análise de dados com a finalidade de realizar ações sobre falhas ou avarias identificadas. Deste modo, para a metodologia FRACA funcionar de forma mais eficiente e superar barreiras organizacionais, desenvolveu-se o procedimento de circuito fechado. Assim sendo, o sistema em circuito fechado permite que o sistema FRACA tenha a oportunidade de melhorar a fiabilidade e o desempenho através de iterações dos relatórios e ações corretivas (Lee et al., 2010). Isto permite que os engenheiros possam supervisionar e analisar os produtos/serviços de forma contínua contribuindo, assim, para a melhoria da fiabilidade dos componentes ou equipamentos (Susanto et al., 2017).

No âmbito da sua estrutura, o sistema FRACA, de uma forma geral, tem dois grandes núcleos principais, ou seja, a informação relacionada com a fiabilidade e as tarefas operacionais (Lee et al., 2010). A informação relacionada com a fiabilidade abrange toda a panóplia de dados associados as falhas e avarias e as tarefas operacionais são todas as ações realizadas para solucionar as falhas ou avarias.

Quando utilizado de forma eficiente e eficaz o sistema de comunicação de falha, análise e ação corretiva (FRACA) de circuito fechado permite fornecer as seguintes informações:

- O que falhou;
- Como falhou;
- Porque falhou;
- Como podem ser eliminadas as falhas no futuro.

O sistema de notificação de falhas em circuito fechado (*Closed loop failure reporting system*) é descrito como um sistema controlado que assegura que todas as falhas e avarias são comunicadas e analisadas (engenharia ou análise laboratorial), e que são, ainda, identificadas e implementadas ações corretivas verificadas por teste para prevenir a recorrência (Department of Defense, 1985).

De acordo com a norma *Military Handbook 338* Edição B, um sistema FRACA de circuito fechado é composto por catorze (14) etapas, esquematicamente ilustradas na figura 1 (Department of Defense, 1998).

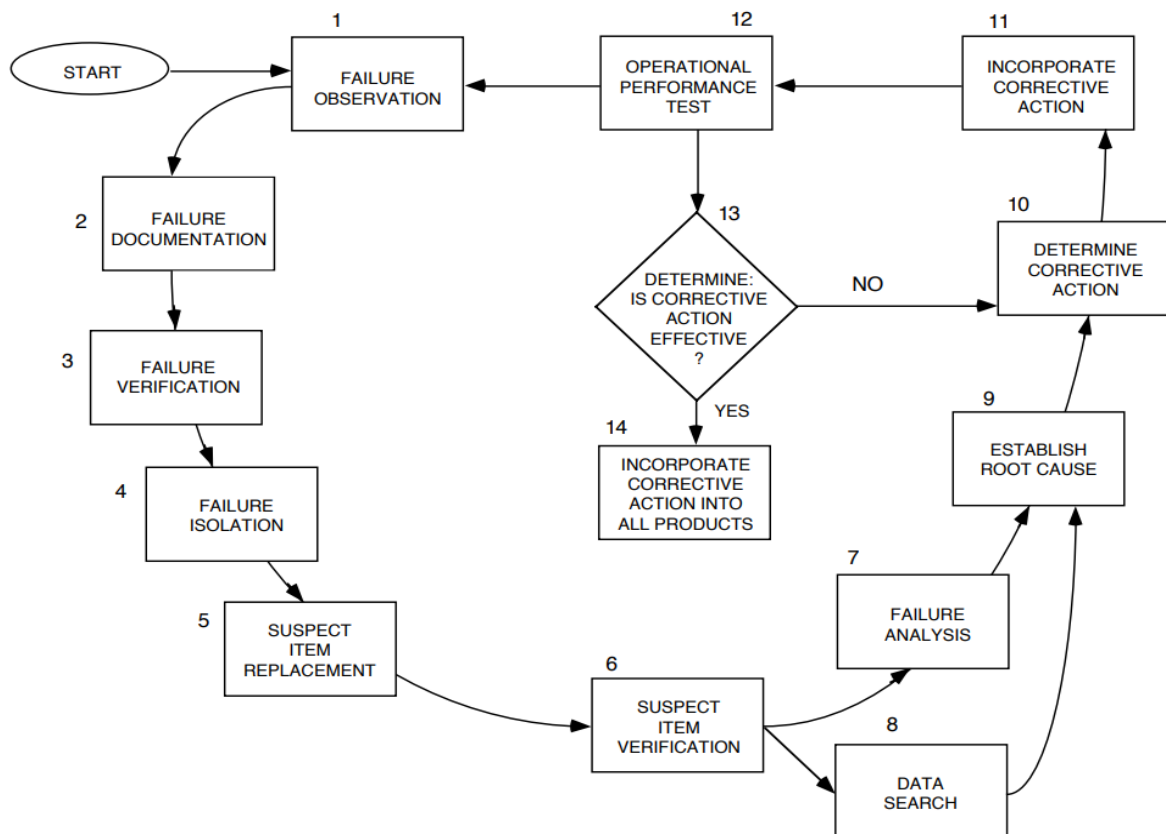


Figura 1 - FRACAS de circuito fechado (Fonte: Department of Defense, 1998)

As etapas ilustrada e correlacionadas na figura 1, são descritas nos seguintes pontos (Department of Defense, 1998):

1. Observação da falha. Uma falha é observada durante alguma operação ou teste;
2. Documentação da falha. A falha observada é totalmente documentada. A eficácia do processo FRACA depende muito da qualidade da informação fornecida.
3. Verificação de falhas. Nesta fase irá ser feita a reconfirmação e assim validar a observação inicial da falha.
4. Isolar as falhas. No isolamento da falha é feita a localização da falha no item/componente defeituoso.
5. Substituir o item defeituoso. É feita a substituição do item defeituoso (suspeito) por um item sem defeito (conhecido e reensaio do sistema/equipamento) para garantir que esta substituição corrige de facto a falha originalmente comunicada.
6. Verificar se a falha resulta do item suspeito. Reensaio do item/componente suspeito para verificar se é defeituoso.

7. Análise de falhas do item defeituoso. Este procedimento é realizado por forma a conhecer o mecanismo de falha interna responsável pela falha observada ou pelo modo de falha.
8. Pesquisa dos dados. A pesquisa de dados existentes é feita para descobrir ocorrências de falhas semelhantes neste ou em itens/componentes relacionados, ou seja, estabelecer a perspectiva histórica do modo de falha/mecanismo de falha observado.
9. Determinar a causa raiz. A causa raiz da falha observada é determinada a partir da utilizando os dados oriundos das etapas 7 e 8.
10. Determinar a ação corretiva necessária para evitar a repetição de falhas futuras, nomeadamente alteração na produção, no processo, no procedimento, etc. A decisão sobre a ação corretiva adequada deve ser tomada por uma equipa interdisciplinar de produção.
11. Incorporação da ação corretiva recomendada no sistema/equipamento de ensaio original.
12. Teste de desempenho operacional. Nesta etapa é feito um reensaio do sistema/equipamento com a modificação proposta da ação corretiva incorporada.
13. Determinar a eficácia da ação corretiva. Após o reensaio e revisão de todos os dados das ações aplicadas é determinado se a ação corretiva proposta é eficaz.
14. Incorporação da ação corretiva a todos os sistemas/equipamentos. Após a eficácia da ação corretiva proposta ter sido comprovada, a ação corretiva é então incorporada nos sistemas/equipamentos.

Dentro do modelo FRACA existe um grupo de intervenientes, que normalmente, são as divisões que se relacionam diretamente com as falhas (Lee et al., 2010). Assim, os elementos que irão participar no processo FRACA podem variar, ficando dependentes de variáveis como a estrutura da organização e a forma como o responsável do projeto delega as responsabilidades nos diversos grupos e seus integrantes. Assim sendo, de uma forma geral, os grupos intervenientes que têm uma parte ativa na aplicação desta ferramenta são os departamentos de engenharia de fiabilidade, através dos engenheiros e técnicos de manutenção e fiabilidade, as divisões de inspeção e teste, os grupos de gestão de projeto e um conselho de revisão de falha que será abordado no subcapítulo 2.1.7.

A tabela 2 ilustra a organização das catorze (14) etapas em que consiste o processo do FRACAS e relaciona-as com os grupos intervenientes/responsáveis, bem como, as ações ou informações associadas a cada uma dessas etapas.

Tabela 2 - Composição do processo FRACAS (Fonte: Adaptado de Lee et. al., 2010)

| <i>Etapa</i> | <i>Tarefa</i> | <i>Responsabilidade</i> | <i>Informação</i> |
|--------------|---|-------------------------|---|
| 1 | Observação da falha | Utilizador | Observação do artigo/ Dados/ Tempo/ Localização/ Ambiente |
| 2 | Documentação da falha | Divisão de teste | Descrição de falhas; Causa raiz esperada |
| 3 | Verificação da falha | Divisão de teste | Lista de verificação (<i>Check list</i>) |
| 4 | Isolar as falhas | Divisão de teste | Modo de falha |
| 5 | Substituir item defeituoso | Divisão de teste | Relatório de teste |
| 6 | Verificar se a falha resulta do item suspeito | Divisão de teste | Descrição da reparação; Relatório de verificação |
| 7 | Análise de falhas do item defeituoso | Divisão de fiabilidade | Método de análise Relatório de análise |
| 8 | Pesquisa dos dados | Divisão de fiabilidade | Pesquisa na base de dados; Resultado |
| 9 | Determinar a causa raiz | Divisão de fiabilidade | Mecanismo Raiz Identificação da causa |
| 10 | Determinar a ação corretiva necessária | FRB | Resultado da análise |
| 11 | Incorporação da ação corretiva | FRB | Especificações da ação |
| 12 | Teste de desempenho operacional | FRB | Relatório do desempenho |
| 13 | Determinação da eficácia das ações corretivas | FRB | Resultado da eficácia |
| 14 | Incorporação da ação corretiva a todos os sistemas/equipamentos | FRB | Especificações da ação |

Por fim, de acordo com o Department of Defense (1980, 1998), o conjunto de procedimentos/ações chaves que tornam eficaz o ciclo de comunicação de falhas e de ações corretivas são:

- Disciplina na redação do relatório para que seja assegurada uma descrição exata da ocorrência de falhas e uma identificação adequada dos itens falhados;
- Dados de entrada precisos, ou seja, relatórios que documentem as falhas/anomalias e o isolamento das causas de falha;
- Atribuição adequada de prioridade e a decisão de análise de falhas deve ser feita com a ajuda de engenheiros de produção e engenheiros/técnicos que conheçam o sistema;
- O estatuto de todas as análises de avarias deve ser conhecido. É de elevada importância que as análises de falhas sejam exigências prioritárias e que sejam implementadas medidas corretivas o mais rapidamente possível;
- A causa raiz de cada falha deve ser compreendida. Se esta não for corretamente percebida nenhuma ação corretiva, logicamente derivada, pode ser seguida;
- Deve haver um meio que permita tabular a informação sobre falhas para que seja possível determinar as tendências e os tempos médios entre falhas de elementos do sistema. Deve haver também um meio que permita visualizar a gestão sobre o estado das disposições de relatório de falhas e das ações corretivas;
- O sistema deve prever a concordância da gestão técnica de alto nível nos resultados da análise de falhas, a solidez da ação corretiva, e a realização de ações formais no circuito de correção e prevenção de reincidência;
- Relatório sumário de falhas que agrupa informações sobre falhas de itens semelhantes ou falhas funcionais semelhantes. Com esta informação, pode ser formulada a necessidade e a extensão da ação corretiva contemplada e o seu impacto.

2.1.3 Sistema de comunicação de falha

As falhas e avarias que ocorram durante as inspeções e testes apropriados devem ser comunicadas. A comunicação da falha (*Failure Reporting*) é o momento vital, o epicentro e a chave para a eficiência na utilização da FRACA onde a disciplina, a rapidez e o rigor são características essenciais para o sucesso desta fase.

O formulário de relatório de falhas permanece com o item original avariado até ser concluído o processo. Neste, o responsável pelo equipamento deve fazer cópias separadamente para cada componente e introduzir o número de defeitos nas respectivas cópias. Ao completar a ordenação inicial para componentes separados, deve ser preenchido um documento secundário para cada um desses conjuntos (Department of Defense, 1998).

Por fim, é imperativo que os relatórios de falhas e as conseqüentes ações corretivas sejam documentados, pois sem estes dados não temos capacidade de edificar um histórico fiável e completo. Além disso, é vital que todas as falhas comunicadas sejam verificadas como falhas reais ou, se não for possível, deve ser dada uma explicação para a falta de verificação. Assim, conforme dita o Department of Defense (1985), a verificação de falhas é determinada pela repetição do modo de falha no item comunicado ou pela prova de falha (resíduo de fuga, equipamento danificado, análise de indicadores, etc.).

2.1.4 Recolha e documentação de dados

Um sistema *Failure Reporting, Analysis and Corrective Action* (FRACA) só será eficaz se os dados introduzidos nos relatórios que documentam falhas e avarias forem exatos. Os dados essenciais devem documentar todas as condições em torno de uma falha ou avaria de forma a facilitar a determinação da causa (Department of Defense, 1985). Aliás, os dados de falhas são úteis apenas quando reunidos em conjuntos de dados que possam ser agrupados e geridos, com o propósito de realizar uma avaliação o mais objetiva possível. Assim, de acordo com o Department of Defense, (1998), devem ser disponibilizadas informações essenciais/imprescindíveis, tais como:

- Localização da falha;
- Data e hora da falha;
- Número da parte do sistema/equipamento avariado;
- Número de série do sistema/equipamento avariado;
- Número do modelo do sistema/equipamento avariado;
- Sintomas de falha observados;
- Nome do indivíduo que observou o fracasso;
- Todas as condições significativas que existiam no momento do fracasso observado;

No âmbito de recolha de dados sobre avarias de equipamento, a forma prática de serem obtidos pode ser feita com recurso a qualquer um dos seguintes tipos de fontes (Department of Defense, 1998):

- Testes de verificação de produção;
- Testes de pré-produção;
- Testes de produção;
- Dados de campo.

O sistema de dados de falhas deve ser concebido para recolher informações de falhas, recuperar informações de falhas semelhantes e fornecer os meios para exibir os dados de falhas, de forma a facilitar o entendimento das mesmas. Esses dados devem originar resultados que, por sua vez, devem ser adaptados para fornecer resumos e relatórios especiais, tanto para o pessoal de gestão como para o de engenharia.

Contudo, na realidade, existem variadas complicações num processo FRACAS. Centrado na recolha de informação, verifica-se que esta pode ter uma grande variedade na qualidade de recolha, uma vez que é feita por diferentes pessoas. A falha comunicada pode ser observada e relatada, por exemplo, pelo utilizador, pelos elementos de serviço, pelos elementos do depósito ou pelos elementos de reparação e, todos estes sensores de recolha de informação têm diferentes processos de recolha de dados da falha (Ciemian, 2008). Neste âmbito, de acordo com Susanto et al. (2017), são reconhecidas três causas principais para a perda de dados importantes, que são:

- Inspeção e testes que têm início antes da existência do procedimento de notificação de falhas;
- O formulário do relatório de falha, que é difícil de utilizar;
- O elemento que preenche o formulário da falha ainda não está totalmente familiarizado com os objetivos e a finalidade da execução do formulário.

A fim de mitigar ao máximo as causas mencionadas, deve-se proporcionar a formação mais indiciada com a devida antecedência a todos os elementos que podem ser os primeiros a identificar a causa, como por exemplo, o utilizador do respetivo equipamento.

Após o processo de recolha de dados, estes são introduzidos numa base de dados que formalmente adota os requisitos que o FRACAS necessita. Idealmente, esta base de dados deve requerer um certo nível de detalhe e um mínimo de informações obrigatórias

e necessárias, sendo que, estes dados restringem a informação recolhida, eliminando informações desnecessárias e exigindo detalhes úteis (Hallquist & Schick, 2004).

Por fim, devem ser mantidos os registos de todas as falhas comunicadas, investigações e análises de falhas, atribuições de causas de falhas, medidas corretivas tomadas e eficácia destas medidas. Estes registos devem ser organizados de modo a permitir uma recuperação eficiente para as tendências de falhas, resumo de falhas e relatórios de estado, conhecimento de falhas anteriores e análises de falhas, e monitorização de ações corretivas. A documentação de falhas deve incluir uma identificação de referência uniforme para fornecer uma rastreabilidade completa de todos os registos e ações tomadas para cada falha comunicada (Department of Defense, 1985).

2.1.4.1 Sistema de documentação de dados

Com o incremento das tecnologias de informação (TI) a manutenção de registos precisos e atualizados, através da implementação do sistema *data reporting, analysis and corrective action* (DRACA), proporciona uma base de experiência dinâmica e em grande expansão. Devido à semelhança de nomenclatura e alguns procedimentos, o termo DRACA e FRACA são frequentemente confundidos de forma errada (AR&M, 2012).

Neste âmbito, o sistema FRACA centra-se na resolução de falhas e todo o seu sistema gira à volta destas, ao invés disso, o sistema DRACA centra-se nos dados que são fornecidos a partir das falhas e coleta mais indicadores que possam contribuir para um aumento de fiabilidade na manutenção. De acordo com a MODUK (2013), o DRACAS é um sistema documentado de ciclo fechado para a comunicação, recolha, registo, análise, categorização e investigação de dados, por forma a tomar medidas de ação corretivas atempadas e eficazes.

Por fim, com o avanço da era digital é fundamental a utilização das TI para manipular, documentar e arquivar a enorme quantidade de dados que estes sistemas podem gerar ao longo dos anos de uma organização. Ter um histórico robusto permite que uma organização tenha uma base de informação para resolver tipos de falhas com elevadas incidências. Da mesma forma, a capacidade de processamento das TI auxiliam os engenheiros e chefias a gerar e manipular informações para que possam auxiliar nas tomadas de decisões.

2.1.5 Análise de falha

No processo FRACA, após ocorrer a falha e esta ser comunicada, existe a necessidade de reconhecer o mecanismo que levou à ocorrência da falha observada ou o modo de falha de um determinado componente defeituoso. Este processo é conhecido como a análise de falha. Desta forma, de acordo o Department of Defense (1985) a análise de falha é definida como a determinação da causa da falha através de raciocínio lógico, a partir do exame dos dados, sintomas, provas físicas disponíveis e resultados de análises laboratoriais.

Os procedimentos FRACA devem incluir requisitos para a documentação dos resultados e conclusões das investigações, e análises de falhas que, devem consistir em qualquer método aplicável (por exemplo, teste, estudo de aplicação, dissecação, ensaios não destrutivos, etc.) que possa ser necessário para determinar a causa da falha (Department of Defense, 1985).

Numa etapa primitiva da análise de falhas é fulcral que seja feita a revisão da informação da falha pelo pessoal competente. Com base na respetiva revisão da informação de falhas, deve ser desenvolvido um plano de análise de falha para descrever as etapas que a análise irá tomar e para impedir a eliminação prematura dos itens falhados antes de serem submetidos às análises necessárias.

A execução da análise de falhas pode variar desde uma simples investigação das circunstâncias que envolvem a falha até uma análise laboratorial sofisticada dos componentes que falharam. Aliás, por vezes, as causas de falhas até podem ser determinadas através de um simples diálogo técnico entre engenheiros de produção e de fiabilidade. Contudo, pode ser feita a análise da falha com recurso a uma análise laboratorial, de modo a revelar o mecanismo de falha com maior qualidade e fornecer a base para uma ação corretiva eficaz. Desta forma, o nível de análise deve ser sempre adequado por forma a fornecer uma compreensão da causa da falha para, posteriormente, que seja possível serem desenvolvidas ações corretivas logicamente derivadas (Department of Defense, 1985, 1998).

Por fim, os resultados da análise de falhas devem ser comunicados ao pessoal experiente para que este possa decidir sobre uma linha de ação apropriada para resolver o problema originado pela falha. Desta forma, a análise de falha é de elevada importância para o processo FRACA, pois é a partir dos seus resultados que serão tomadas as decisões das ações corretivas, o que influencia diretamente a eficiência do processo.

2.1.6 Ação corretiva e procedimentos de encerramento do processo

Quando a causa de uma falha tiver sido determinada, deve ser desenvolvida, documentada e implementada uma ação corretiva para eliminar ou reduzir a recorrência da falha. Na prática, a implementação da ação corretiva deve ser aprovada pelo pessoal responsável e com competência pela decisão a realizar (Department of Defense, 1985).

O sistema FRACA deve enfatizar a investigação e análise de todas as falhas, independentemente da sua aparente frequência ou impacto. É facilmente compreensível que a reparação mais econômica de uma falha ocorre ao nível da peça. Desta forma, a análise assume um papel fundamental pois a degradação de uma peça escala rapidamente para níveis maiores, como por exemplo subconjunto, se não for detetada e reparada de forma rápida e eficaz.

Um raciocínio convencional para perceber este tipo de custo é que uma ação de reparação a nível de subconjunto custa uma ordem de magnitude superior à de uma peça, e uma reparação a nível de produto custa uma ordem de magnitude superior à de uma reparação a nível de subconjunto (Department of Defense, 1998). Deste modo, a eliminação precoce das causas de falhas é um contributo importante para o crescimento da fiabilidade e a obtenção de uma fiabilidade aceitável no terreno. Assim, quanto mais cedo as causas de falhas puderem ser identificadas, mais fácil será a implementação de ações corretivas eficazes (Department of Defense, 1980).

A ação corretiva gerada deve ser documentada em detalhe para que possa ser implementada e verificada ao nível adequado. Após a implementação de uma ação corretiva, esta deve ser monitorizada para assegurar que a ação corretiva removeu as causas de falha e não introduziu novos problemas (Department of Defense, 1985). Deste modo, é possível prevenir prováveis reincidências e ter um histórico de ação para a resolução de falhas e avarias semelhantes.

Todos os relatórios abertos, análises e datas de suspensão das ações corretivas serão revistas para assegurar o encerramento atempado dos relatórios de falhas. Um relatório de falhas será considerado encerrado após a conclusão da implementação e verificação da ação corretiva ou da justificação nos casos em que a ação corretiva não foi implementada. A decisão de não realizar nenhuma ação corretiva deve ser documentada e aprovada pela autoridade responsável (Department of Defense, 1985).

Por fim, no processo de um sistema FRACA é relevante identificar e controlar todos os componentes que falharam. Assim, todos os artigos falhados devem ser visivelmente assinalados ou etiquetados, para que seja facilmente perceptível que são componentes com falhas e, ainda, para que não se perder o seu controlo e rastreabilidade (Department of Defense, 1985). Além disso, estes artigos devem ser colocados em caixas, contentores ou locais isolados e não devem ser abertos, distribuídos ou mal manuseados ao ponto de obliterar factos que possam ser pertinentes para uma análise. Este controlo terá de ser efetuado até à conclusão das análises de falhas onde, posteriormente, aguardam pela autorização dos elementos competentes para seguir o respetivo processo.

2.1.7 Conselho de revisão de falhas

Um sistema FRACA é um sistema complexo que necessita de ações rápidas e direcionadas, análises cautelosas e decisões ponderadas no menor tempo possível para aumentar a eficiência do processo e diminuir as perdas. Por forma a contribuir para estas atividades, pode ser criado um conselho de revisões de falhas ou *Failure Review Board* (FRB) que tem como missão supervisionar o funcionamento do sistema FRACA.

De acordo com o Department of Defense (1985), o conceito de conselho de revisão de falhas é descrito como um grupo constituído por representantes de organizações com o nível de responsabilidade e autoridade para assegurar que as causas de falhas são identificadas e que as ações corretivas são efetuadas. De forma convergente, o FRB é um grupo criado pela organização, com elementos qualificados e credíveis, que tem a responsabilidade de identificar as falhas e a autoridade para implementar ações corretivas eficazes, que se destinam a prevenir a recorrência das falhas e a simplificar ou reduzir as tarefas de manutenção.

Desta forma, o objetivo do FRB é proporcionar uma maior visibilidade e controlo da gestão do sistema FRACA. De facto, este conselho (FRB) detém como principais funções a revisão de tendências de falhas significativas, o estado das ações corretivas utilizadas e, também, assegurar que as ações corretivas adequadas são selecionadas atempadamente e registadas durante todas as fases de um sistema (Department of Defense, 1980).

A figura 3 ilustra o sistema FRACA de circuito fechado, o mesmo sistema que se encontra exposto na figura 1, incrementando a integração de um conselho de revisão de falha (FRB).

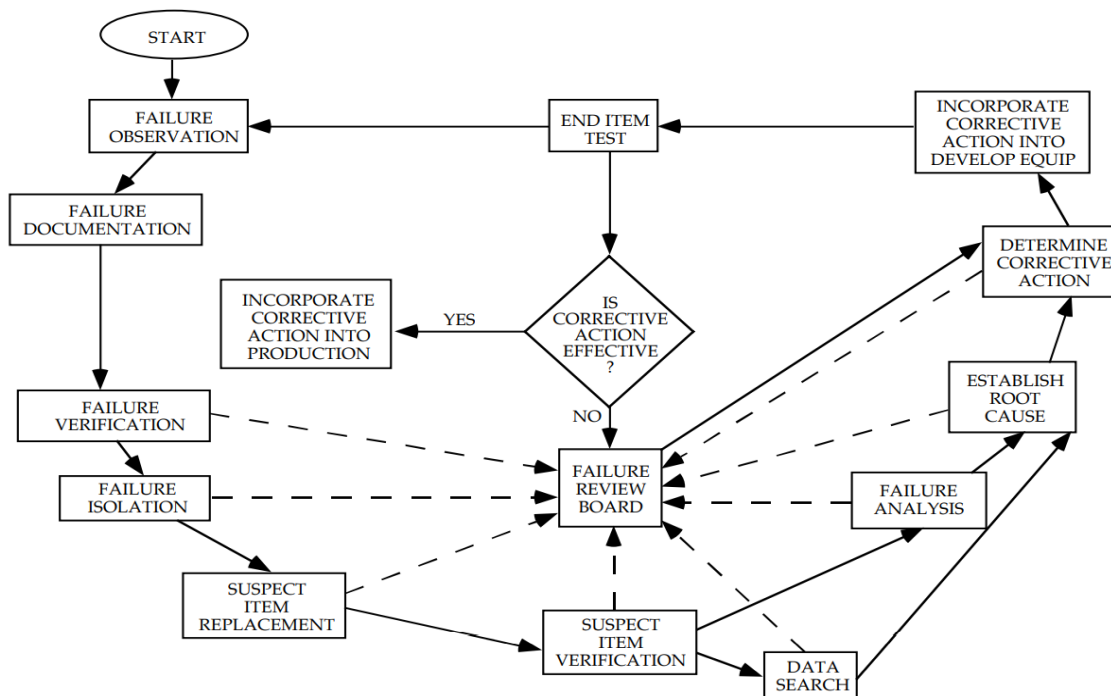


Figura 3 - FRACAS de circuito fechado com FBR (Fonte: Department of Defense, 1998)

Relativamente à composição do FRB, esta é geralmente constituída por elementos de gestão de nível superior que possuem autoridade organizacional para estabelecer prioridades, organizar horários, atribuir responsabilidades específicas e autorizar financiamento adequado para assegurar a implementação de quaisquer alterações necessárias quando se lida com problemas complexos e difíceis. Assim, os membros do FRB devem incluir representantes apropriados das atividades de produção, fiabilidade, segurança do sistema, manutenção, fabrico de peças e gestão da qualidade (Department of Defense, 1980, 1998).

Para aumentar o sucesso nas ações deste conselho é importante frisar os seguintes aspetos (Department of Defense, 1985):

- O FRB deve rever os dados de falhas funcionais/desempenho de inspeções e testes adequados, incluindo a qualificação de subcontratados, fiabilidade e falhas nos testes de aceitação;
- Toda a informação sobre a ocorrência de falhas deverá estar disponível para o FRB, designadamente, dados de descrição das condições do teste no momento da falha, sintomas da falha, procedimentos de isolamento da falha, e causas conhecidas ou suspeitas da falha serão examinados pelo FRB;

- Qualquer falha iniciada deve ser acompanhada pelo FRB até que os mecanismos de falha tenham sido satisfatoriamente identificados e tenha sido iniciada a ação corretiva;
- O FRB deve divulgar o estado de implementação e eficácia da ação corretiva;
- O FRB deve reunir-se regularmente para rever os dados de falhas das Inspeções e testes adequados, incluindo as falhas nos testes;
- As atas das atividades do FRB devem ser registadas e arquivadas.

Em suma, o concelho geral é considerado um órgão central de administração de um sistema FRACA garantindo que todos os processos estão a ser cumpridos, agilizando os procedimentos e mantendo um total controlo de todas as tarefas, por forma a aumentar a eficiência do processo e diminuir as perdas.

2.1.8 Planeamento e modelos do processo de FRACAS

Qualquer sistema FRACA tem a necessidade de definir a estratégia num plano para atingir objetivos. Deste modo, a FRACAS sem um plano prévio destina-se a ser um processo ineficiente e demorado, pois há uma tendência natural para este tipo de sistemas serem desorganizados e o início das suas ações serem imprevisíveis em grande parte dos acontecimentos.

Assim, existe a necessidade de haver um planeamento para o sistema FRACA. Este planeamento envolve a preparação de procedimentos escritos para o início de relatórios de falhas, análise de falhas e feedback de ações corretivas na produção, fabrico e processo de teste (Department of Defense, 1985). Também, neste plano devem ser documentados diagramas de fluxo que descrevam a falha de equipamentos e o fluxo de dados de falha. A figura 4 ilustra um diagrama de fluxo do processo FRACA da empresa Metrolinx (2020).

O plano do programa deve descrever de forma clara a proposta do sistema FRACA. Além desta descrição, o plano deve contemplar a identificação das ações a tomar para assegurar que são implementadas medidas corretivas eficazes em tempo útil. Ainda remetente ao plano, é importante identificar nele os níveis de montagem e teste a serem realizados pelo sistema FRACA, dar definições para cada uma das categorias de causa de falhas conhecidas, identificar os requisitos de apoio logístico e identificar os itens de dados necessários para a entrega (Department of Defense, 1998).

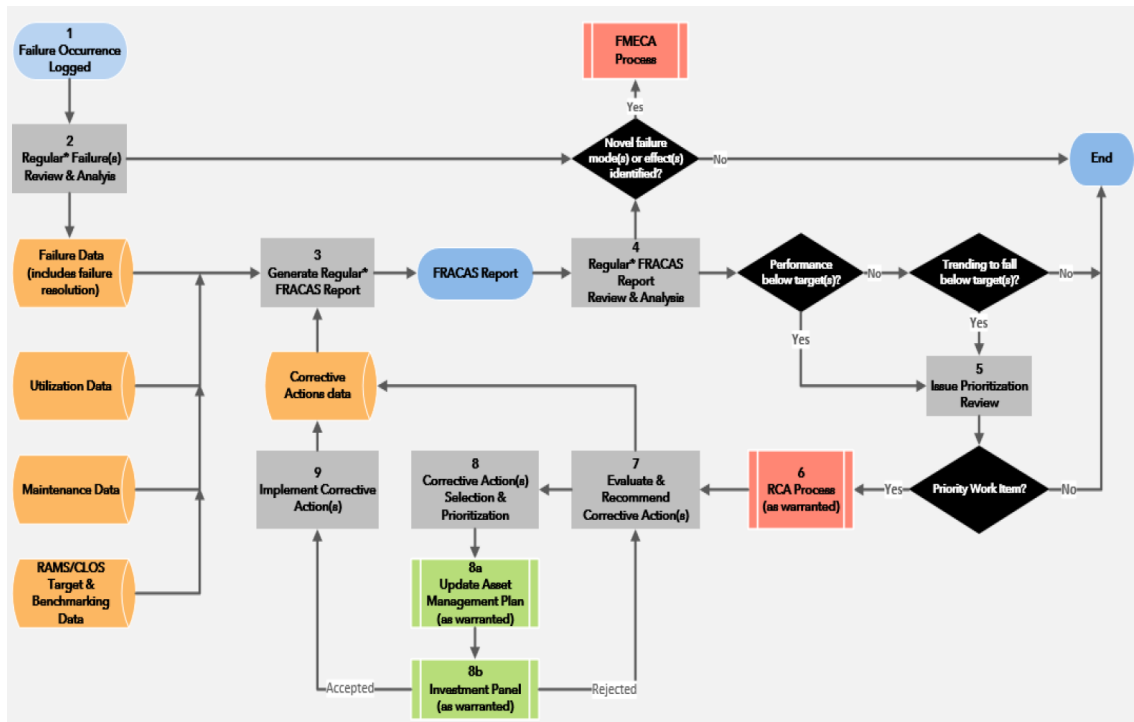


Figura 4 - Fluxograma do processo FRACAS da empresa Metrolinx (Fonte: Metrolinx, 2020)

Por fim, é necessário fazer uma revisão de todos os procedimentos e programas para evitar a duplicação de esforços entre ações de fiabilidade e outras, tais como, ações de qualidade, manutenção, teste, segurança e apoio logístico (Department of Defense, 1985). A duplicação de esforço fomenta um incremento de ações desnecessárias ao processo, o que origina sucessivamente, um incremento proporcional na ineficácia do mesmo.

2.1.9 Limitações do processo FRACA

É importante perceber que todas os modelos apresentam limitações de aplicação ou de outro tipo e, estas, ditam as necessidades de evolução, pois o processo de evolução ocorre após ultrapassar essas mesmas limitações/obstáculos de aplicação. Desta forma, de acordo com Hallquist e Schick (2004), o potencial máximo do sistema FRACA, que representa a melhor qualidade reduzindo simultaneamente os custos, raramente é alcançado devido principalmente aos seguintes aspetos:

- Interação de uma organização complexa;
- Identificação das falhas e rastreio de dados ineficientes e ineficazes;
- Ausência de objetivos priorizados;
- Problemas logísticos;

2.1.9.1 Interação de organização complexa

As organizações são compostas por um conjunto de pessoas que se relacionam por forma a atingir objetivos de acordo com a visão e valores da mesma. A interligação de elementos é um processo extremamente complexo e que requer algum cuidado, pois pode tornar os processos ineficientes.

Os canais de comunicação de uma dada organização, isto é, a forma como a organização faz fluir a informação, são processos que requerem especial atenção e um planeamento prévio. No caso específico do FRACAS, é necessário analisar a forma mais rápida de fluir a informação até ao órgão de decisão de forma a desencadear uma célere resposta mitigando os custos associados ao processo.

De facto, verifica-se quanto mais elementos tem uma dada organização mais complexa é a interação entre eles e mais complexa fica a passagem de informação. Em muitos casos, em tipos de estruturas funcionais, por exemplo, que são mais formais, a transmissão de informação é mais dolorosa pois, esta, ascende e descende ao longo da cadeia de comando. Neste caso, quanto maior for a cadeia de comando mais tempo irá demorar a chegar ao destino o que implica maior ineficiência em um processo FRACA.

Especificamente no sistema FRACA, existem elementos ou funções organizacionais que integram o processo em várias fases e em múltiplos pontos o que, para além da normal dificuldade acima descrita, incrementa uma maior complexidade na comunicação e interação e, também, pode causar atrasos no tempo de resolução do problema.

Por fim, é facilmente perceptível, que a complexa forma de interação organizacional se apresenta como uma limitação ao processo FRACA pois irá atrasar todo o processo, quer seja na forma como a informação circula até ao órgão de decisão, quer seja pela forma como esta circula do órgão de decisão até ao elemento que irá realizar a ação corretiva.

2.1.9.2 Identificação das falhas e rastreio de dados ineficientes e ineficazes

O elemento que identifica a falha irá ser sempre o primeiro a estabelecer contacto com a mesma e, assim, iniciar o processo FRACA. Desta forma, a responsabilidade sobre este elemento é considerável pois, se não possuir qualquer método de controlo de condição, não existe modo de quantificar a falha. Isto implica que ela pode já existir e o elemento não tem capacidade de a reconhecer.

Efetivamente, o atraso na identificação da falha ou avaria provoca maiores danos materiais e cria um atraso no início do processo. Idealmente, o sistema FRACA deveria ser iniciado no preciso momento em que aparece a falha. Como já vimos, a identificação desta apresenta-se, de igual forma, como uma limitação ao processo.

Ainda, a quantidade de dados a reportar pode ser uma limitação enorme ao processo, uma vez que é necessário que estes apresentem valor agregado. De facto, se a informação for reportada em excesso e com baixa utilidade pode criar uma nuvem de confusão e impossibilitar uma decisão acertada.

Por último, se toda a informação não filtrada for colocada na base de dados, o conselho de revisão de falhas terá uma maior dificuldade em analisar o que realmente é importante, o que irá aumentar a ineficácia no processo.

2.1.9.3 Ausência de objetivos priorizados;

De acordo com Chiavenato (2014), os objetivos são o resultado que se procura alcançar em determinado período. Existem objetivos de diferentes períodos temporais dependendo do nível de planeamento em que foram definidos. O tempo e os recursos das organizações são limitados e têm de ser bem direcionados, o que torna fundamental uma correta definição de objetivos e metas por forma a tornar esta ferramenta eficiente.

No caso do FRACAS, a dimensão do seu plano difere de acordo com a dimensão de um determinado projeto ou programa (Ciemian, 2008). Essa dimensão do FRACA tem uma correlação direta com o tempo e esforço atribuídos para a construção do plano. Ainda assim, é importante reter que, devido às limitações de recursos, esquemas totalmente desenvolvidos não são normalmente utilizados a favor do software que já está em uso na organização, como o Microsoft Excel ou bases de dados baseadas em Access (Grönqvist, 2013).

Na verdade, as pessoas não conseguem reconhecer o valor de um sistema FRACA, devido ao facto deste sistema ser um serviço que depende dos elementos da organização ou por ser um serviço interno (Johnston, 2008). De facto, esta falta de reconhecimento inicial por parte dos membros de uma organização, afeta diretamente na fase de planeamento, uma vez que os recursos e a atenção são insuficientes neste momento crítico (Hallquist & Schick, 2004).

Por fim, esta falta de visão e as baixas expectativas no sistema FRACA fazem com que as fatias financeiras atribuídas a este programa sejam insuficientes atribuídas em

fases tardias do projeto. Para ultrapassar este tipo de problemas, deve haver uma definição concreta para a direção do sistema FRACA e devem ser edificados os objetivos dos processos e implementados de acordo com as prioridades previamente atribuídas.

2.1.9.4 Problemas logísticos

A dimensão logística também influencia diretamente na eficiência do FRACA. O mundo atual está em constante mudança e as organizações, independentemente da área de atuação e ambiente que as rodeiam, têm de se preparar para uma globalização. Destas novas e exigentes formas de atuação advêm vários problemas que se podem traduzir em grandes perdas, tais como: perdas decorrentes de operações impróprias, por exemplo os atrasos oriundos do elevado esforço logístico que ambientes deste tipo implicam; informação errada ou falta de entrega de materiais que permitam realizar as ações de manutenção; problemas de expedição de componentes (Lee et al., 2010).

No decorrer do século XXI, as organizações têm vindo a reduzir a quantidade de stock ao mínimo necessário e, inerentemente, reduzir os custos, contudo tornam-se dependentes de organizações externas (outsourcing). Este tipo de estratégia faz-se acompanhar por diversas regalias económicas, porém, eleva o fator de dependência a terceiros. Quando existe um problema com as entidades que funcionam no sistema de rede a organização demora a responder e, por consequência, aumenta a falta de eficiência do FRACA.

2.2 Manutenção e gestão da manutenção

2.2.1 Enquadramento e conceitos da manutenção

A palavra “manutenção” deriva do termo latim “*manutentio*”, que era usado para descrever o ato ou o efeito de manter, conservar ou sustentar. Era amplamente utilizada para a conservação de bens e para providenciar sustento a bens ou pessoas.

No decorrer dos anos este conceito ganhou um destaque especial nas indústrias detentoras de equipamentos, pois percebeu-se que era vital para o bom funcionamento destes e intervinha diretamente no seu tempo de vida. É de tal forma importante que neste momento é uma área de conhecimento e é considerado a ciência que estuda a capacidade de manter, conservar e sustentar bens.

Qualquer estudo, à semelhança de qualquer disciplina na ciência e na tecnologia, deverá iniciar-se com a sua própria definição e apresentação dos conceitos utilizados. É essencial que a linguagem utilizada na manutenção seja o mais conciso, simples e universal possível, por forma a se adaptar a todos os elementos de uma organização, independentemente dos seus conhecimentos e especialização adquirida ou conhecimento académica obtidos.

Ligado ao conceito de manutenção está sempre o conceito de avaria e o conceito de bem (material). Desta forma, o conceito “avaria” é referido como a cessação da aptidão de um bem para cumprir uma função requerida, podendo este estar em falha total ou parcial e o conceito, bem como qualquer elemento, componente, aparelho, subsistema, unidade funcional, equipamento ou sistema que possa ser considerado individualmente (Instituto Português da Qualidade, 2007).

Aliás, o Instituto Português da Qualidade (2007) , através da norma portuguesa “NP EN 13306:2007”, define a manutenção como a combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou a repô-lo num estado em que possa desempenhar a função requerida. Deste modo, a manutenção são todas as ações que permitem manter o bem a desempenhar a função para o qual foi projetado ou que volte a desempenhar essas funções após este apresentar problemas de funcionamento.

Ainda, segundo Pinto (2013), a “manutenção” é descrita como as atividades destinadas a manter os equipamentos em condições próprias de funcionamento, através de intervenções, reparações de avarias e substituições de peças. Isto é, realizar intervenções necessárias por forma a manter ou recuperar a performance de um dado equipamento.

A capacidade de manutenção é a forma como um determinado item recupera a condição específica com recurso ao tempo, aos materiais, às finanças e ao pessoal Department of Defense (1989). Assim, as ações de manutenção, a cada nível discriminado de manutenção e reparação, são realizadas por pessoal com níveis de aptidão específicos, fazendo recurso aos meios e procedimentos adequados. Na prática, a capacidade de manutenção é o nível de facilidade operacional e económico que uma organização tem para estabelecer o normal funcionamento de um equipamento.

A gestão da manutenção é definida como todas as atividades de gestão que determinam os objetivos, a estratégia e as responsabilidades respeitantes à manutenção. As atividades de gestão da manutenção são implementadas por diversos meios, tais como

o planeamento, o controlo e supervisão da manutenção e a melhoria de métodos na organização, incluindo aspetos económicos (Instituto Português da Qualidade, 2007).

Por último, a disponibilidade é descrita como a aptidão que um bem tem para cumprir uma função requerida sob determinadas condições num dado instante, ou durante um intervalo de tempo, assumindo que é assegurado o fornecimento dos recursos externos necessários (Instituto Português da Qualidade, 2007).

2.2.2 Modelos da manutenção

Com o aumento dos estudos na área da manutenção começaram a surgir variados tipos de manutenções. Assim, atualmente existem diversos modelos publicados por autores e entidades, contudo não existe um único modelo de referência. Quando verificamos um determinado modelo é imperativo entender o conceito por detrás da nomenclatura utilizada, para que a divergências de designações não entre em discordância com a doutrina existente.

Assim, a normal portuguesa NP EN 13306:2007 faz referência aos seguintes conceitos dos tipos de manutenção (Instituto Português da Qualidade, 2007):

- **Manutenção Corretiva:** “É a manutenção efetuada depois da deteção de uma avaria, e destinada a repor o bem num estado que possa realizar uma função requerida.”
- **Manutenção Preventiva:** “Manutenção efetuada em intervalos de tempo pré-determinados ou de acordo com critérios prescritos com a finalidade de reduzir a probabilidade de avaria ou degradação do funcionamento de um bem.”
- **Manutenção Preventiva Sistemática (Periódica):** “Manutenção preventiva efetuada em intervalos de tempo pré-estabelecidos ou segundo um número definido de unidades de utilização, mas sem controlo prévio do estado do bem.”
- **Manutenção Preventiva Condicionada:** “Manutenção preventiva baseada na vigilância do funcionamento do bem e/ou dos parâmetros significativos desse funcionamento, integrando as ações daí decorrentes.”

Desta forma, a figura 5 exterioriza o modelo dos tipos de manutenção apresentados na norma NP EN 13306:2007 do IPQ.

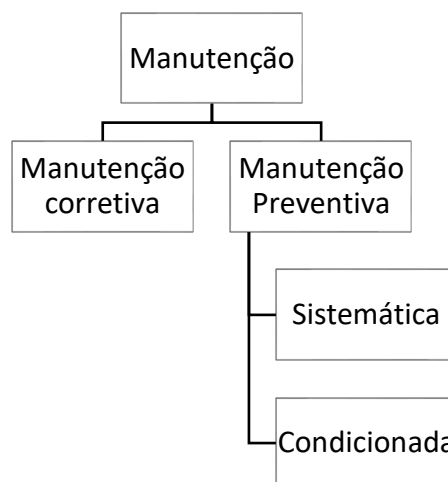


Figura 5 - Tipos de manutenção (Fonte: Adaptado do Instituto Português da Qualidade, 2007)

A manutenção corretiva é o tipo de manutenção que só é aplicada após os danos no equipamento serem tão severos que este deixa de realizar o seu normal funcionamento. Este tipo de manutenção não é planeado e, portanto, ocorre num período incerto após a paragem do equipamento ou após este apresentar um funcionamento defeituoso. A filosofia deste tipo de manutenção é utilizar o equipamento até avariar e só reparar depois deste acontecimento.

De facto, a Manutenção Corretiva pode ser definida como o conjunto de tarefas de reparação de cada avaria que surjam sem aviso antecedente e cuja possibilidade de resolução não foi decidida pelo gestor da manutenção (Cabral, 2006).

A manutenção preventiva é a política de manutenção onde são realizadas ações para conservar o equipamento antes que ocorra a falha, isto é, são todas as ações de conservação, monitorização e reparação realizadas num equipamento para manter o seu normal funcionamento e antes do aparecimento da falha. Assim, segundo Mobley (2004), as ações de manutenção preventivas visam evitar tempos de paragem não programados e danos nos equipamentos, que poderiam resultar em ações corretivas. Isto implica que todas as ações desta política de manutenção sejam planeadas por forma a evitar que existam avarias que levem à falha do bem.

Concluindo, a manutenção preventiva pode ser realizada através da monitorização sistemática ou através do controlo pela condição do equipamento. A manutenção sistemática implica que ações realizadas sejam planeadas e realizadas num período fixo. Ao contrário desta, a manutenção condicionada requer uma análise periódica do estado de funcionamento do ativo, através de equipamentos que permitem medir diversos

parâmetros. Esta análise é realizada ao longo do ciclo de funcionamento do equipamento e permite determinar, através de análises de tendências, qual é o melhor período para realizar a intervenção, sendo que, só é realizada quando existem indícios de mau funcionamento.

2.2.2.1 Manutenção corretiva

A manutenção corretiva caracteriza-se por ser uma manutenção não periódica e que é realizada apenas quando as avarias ocorrem, sendo que, o seu objetivo principal é colocar o equipamento em funcionamento com a maior brevidade possível (Dias, 2013).

Na verdade, de acordo com Pinto (2013), este modelo de manutenção é considerado um modelo reativo, pois é uma reação após a ocorrência de uma avaria. Segundo o autor supramencionado, o modelo de manutenção corretiva é considerado de fácil implementação, visto que não necessita de uma estrutura organizada para o implementar, necessitando apenas de meios humanos e materiais para realizar os trabalhos.

Por último, este tipo de manutenção não é a melhor pois os danos são de tal ordem que danificam de forma permanente um bem. A reparação de um ativo após a avaria implica elevados custos e só se justifica a utilização desta política de manutenção quando os custos de prevenção e monitorização são superiores aos custos estimados para as consequências das falhas.

2.2.2.2 Manutenção preventiva sistemática

A manutenção preventiva sistemática é um modelo que detém como base a análise da probabilidade de avarias originadas pelo uso recorrendo do equipamento e fazendo recurso aos registos existentes, isto é, ao seu histórico. Este tipo de ações são planeadas e são conhecidas por ter uma periodicidade fixa que é comumente associada a métodos de calendários devido a este fator.

Normalmente, segundo Dias (2013), a manutenção preventiva sistemática tem uma aplicação nos seguintes equipamentos:

- Equipamentos onde a ocorrência da avaria pode implicar a paragem da instalação;
- Equipamentos onde a avaria pode colocar em causa a segurança das pessoas;

- Equipamentos em que a avaria possa provocar paragens longas na produção.

De acordo com Cabral (2006), os trabalhos de revisão sistemática, as inspeções de rotinas, as lubrificações de rotinas, as confirmações meteorológicas e as substituições de componentes integram o leque de ações da manutenção preventiva sistemática.

Segundo com Pinto (2013) as vantagens deste modelo centram-se no aumento da disponibilidade dos equipamentos, na redução das perdas de produção e na redução dos custos de não manutenção, uma vez que existe planeamento agregado e redução dos defeitos de produção e taxas de retrabalho.

A figura 6 ilustra um esquema de manutenção preventiva sistemática, onde é possível observar dois ciclos de degradação de um determinado equipamento. O primeiro ciclo explana a substituição preventiva de componentes prevenindo a falha onde é possível ver um curto período de paragem. No segundo tempo é demonstrado a degradação de um componente e substituição por avaria, o que ilustra o modelo de manutenção corretiva, e é possível observar que o período de paragem é muito superior.

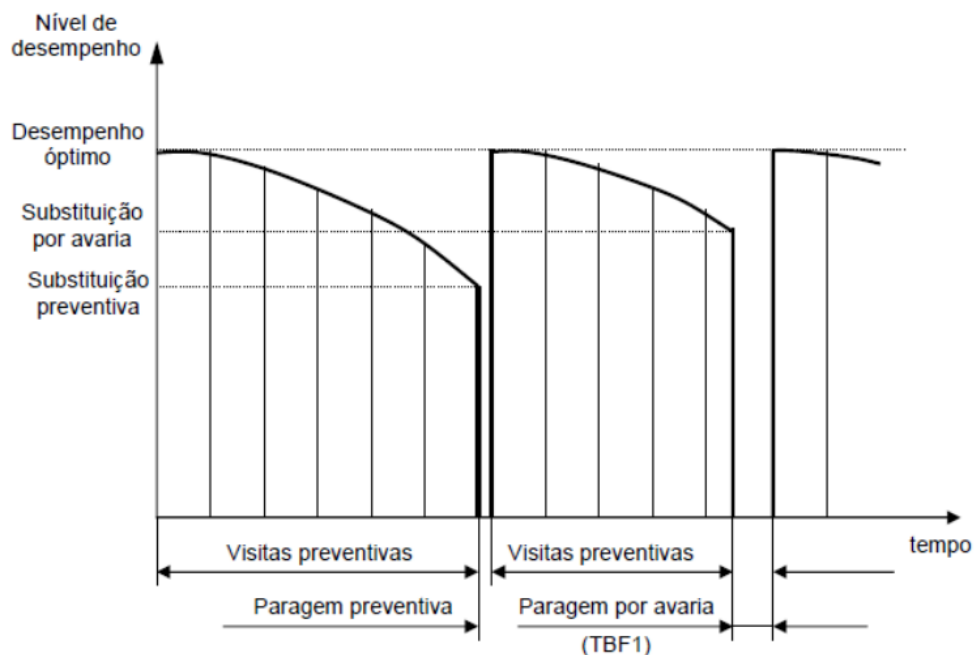


Figura 6 - Esquema de manutenção preventiva sistemática (Fonte: Filipe, 2003)

Contudo, de acordo com Filipe (2006), a figura 6 ilustra uma manutenção preventiva sistemática onde, mesmo que exista uma manutenção planeada e constante, as avarias inesperadas podem ocorrer, o que vai obrigar a realização de intervenções corretivas.

Por fim, de salientar que este tipo de manutenção pode implicar um aumento de tempo de paragem em comparação com a manutenção condicionada, uma vez que se realizam ações de manutenção de forma planeada e sistemática mesmo quando não são necessárias.

2.2.2.3 Manutenção preventiva condicionada

A manutenção condicionada é um tipo de manutenção que faz recurso a várias técnicas de diagnóstico, como análise de vibrações ou termografia, por forma a quantificar características que permitam encontrar possíveis anomalias nos equipamentos. Assim que estas técnicas apresentam valores críticos são efetuadas as intervenções necessárias para que o equipamento volte ao normal funcionamento, sendo que, até esse momento não é feita qualquer reparação no componente.

De facto, para Cabral (2006), a manutenção condicionada permite determinar qual o momento mais adequado para realizar a intervenção num dado componente, de forma a evitar que este falhe, ou seja, apenas é realizada a intervenção quando há indícios de mau funcionamento.

Deste modo, a figura 7 ilustra o período que deve ser realizada a manutenção preventiva condicionada de acordo com a curva P-F.

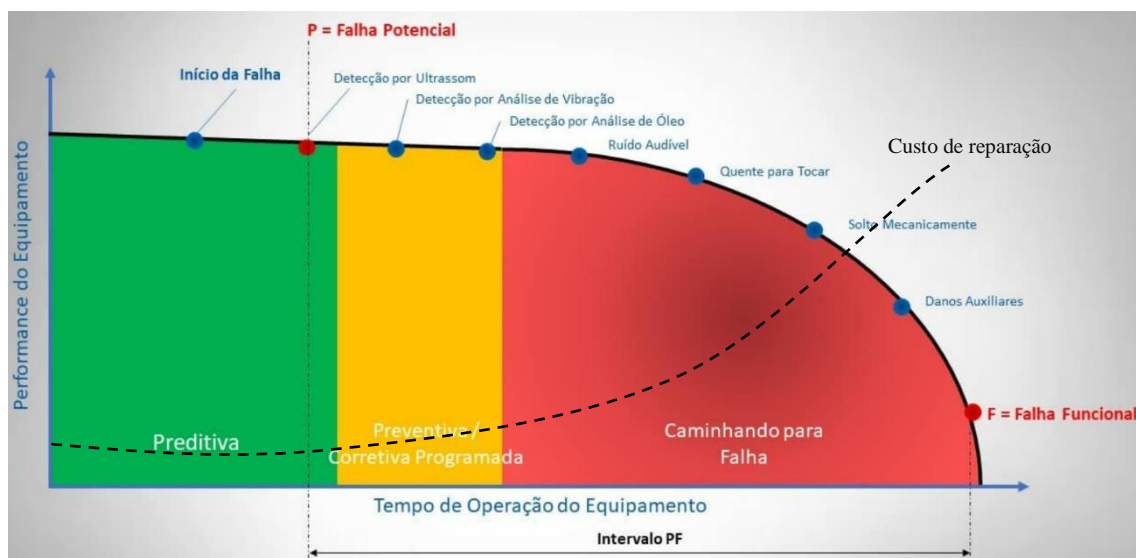


Figura 7 - Curva P-F e períodos de manutenção preventiva condicionada (Fonte: Adaptado de Teles, 2017)

Por último, a manutenção condicionada é realizada, preferencialmente, de forma sistemática até apresentar valores que exteriorizam degradação, sendo que, a partir deste momento existe a necessidade de mexer no bem. Este tipo de manutenção complementa

a manutenção preventiva sistemática, permite um acompanhamento da condição do equipamento de forma constante e, de forma destacada, permite quantificar a falha de modo a perceber quando é que devemos fazer a intervenção

2.2.3 Teoria da Manutenção

A manutenção dos ativos físicos é um assunto amplamente discutido no universo industrial e ganhou elevado destaque porque se estima que 38% do ciclo de vida é dirigido pelas questões de manutenção (National Aeronautics and Space Administration, 2008). Na verdade, além do ciclo de vida, de acordo com Cabral (2006), a manutenção tem um contributo positivo para o bom desempenho produtivo, segurança, qualidade do produto, rentabilidade económica do processo e a preservação dos investimentos (Cabral, 2006).

Segundo Stevenson (2002), o objetivo da manutenção é manter o sistema de produção em pleno funcionamento através de atribuição do menor custo possível. Assim sendo, implica fazer as ações necessárias para que o(s) equipamento(s) continue(m) a produzir e mantenha(m) o normal funcionamento e normal fluxo na produção sem incrementar um valor agregado aos custos que lhe estão associados. À semelhança dos demais autores citados, Pinto (2013) descreve que os objetivos prioritários da manutenção são a maximização da disponibilidade, melhoria da qualidade, redução dos custos, aumento da segurança, melhoria do desempenho e da produtividade e, por fim, contribuição para a realização dos objetivos globais da empresa.

Deste modo, a figura 8 esquematiza os objetivos prioritários da manutenção descritos pelo referido autor. De facto, Cabral (2006) reconhece que os objetivos da manutenção industrial têm de estar ligados aos objetivos globais da empresa, pois esta afeta diretamente a rentabilidade do processo produtivo, isto é, além de todos os benefícios descritos, as ações de manutenção incrementam um custo a organização.



Figura 8 - Principais objetivos da manutenção (Fonte: Pinto, 2013)

Não realizar a manutenção de um equipamento ao longo do seu ciclo de vida não é considerada uma boa estratégia de gestão dos ativos físicos. De acordo com a National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2008, não contemplar a possibilidade de realizar a manutenção pode ser muito dispendioso, uma vez que:

- As ações para corrigir os problemas são notoriamente mais dispendiosas;
- As reparações de emergência provocadas por má manutenção são frequentemente feitas em ambientes e de formas não competitivas;
- As falhas dos equipamentos podem levar à interrupção das operações de forma não planeada;
- Provoca maiores danos no sistema e/ou danos no edifício.

Na verdade, os custos gerados pelos processos visíveis de manutenção são apenas a ponta de um *iceberg* (Mirshawka & Olmedo, 1993). De facto, uma política inadequada de manutenção traduz-se no aumento dos custos relacionados com a falta de produtividade. Deste modo, o número de horas extras efetuadas e os atrasos de quantidade ou a falta de qualidade dos produtos são reflexos das políticas desadequadas (Canuto, 2009). De forma convergente, Rydzewski (2000) refere que uma manutenção deficiente pode resultar num aumento de carga diária do equipamento. Este aumento representa um maior desgaste dos equipamentos pois, o desgaste é proporcional à carga que lhe esta associada. Assim sendo, a manutenção deve definir uma política que permita otimizar os seus custos e, simultaneamente, reduzir os custos de produção.

De acordo com Canuto (2009), a figura 9, considerada por bastantes autores, relaciona os custos diretos da manutenção e os custos indiretos.

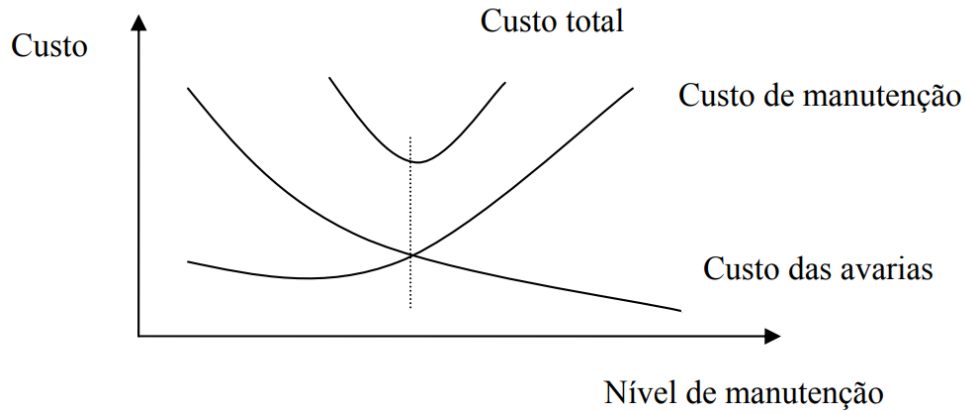


Figura 9 - Relação entre custos diretos e indiretos da manutenção (Fonte: Canuto, 2009)

Na verdade, os custos também podem ser observados pelo tipo de manutenção aplicada em relação aos custos associados aos tempos de paragem de produção. De acordo com Ferreira (1998), é importante definir um nível de manutenção que optimize os custos oriundos de avarias, pois o aumento da despesa de manutenção nem sempre conduz na mesma proporção à redução dos tempos das paragens que ocorrem de forma inopinada. Assim, a figura 10 ilustra uma relação entre os custos diretos da manutenção, os custos de avarias e, ainda, os custos de paragem de produção, fazendo referência à situação de dois tipos de manutenção (A e B).

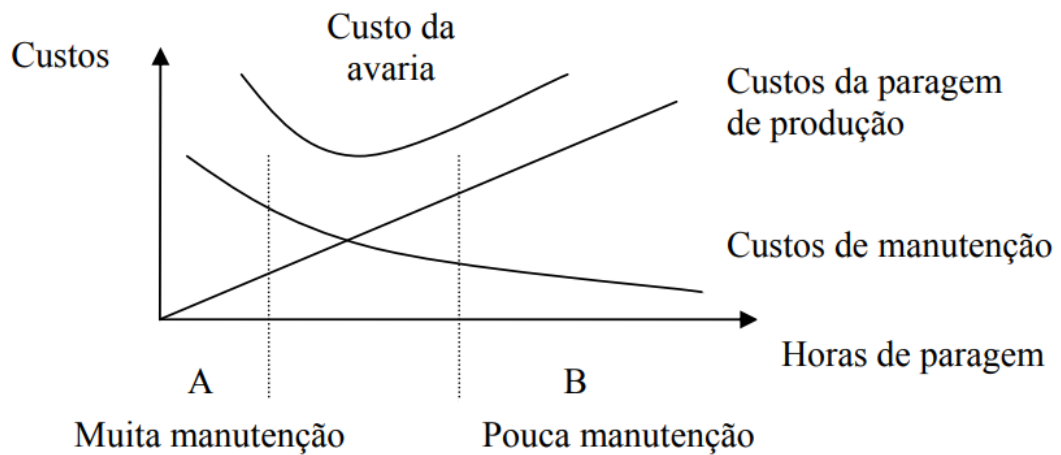


Figura 10 - Relação entre custos da manutenção e de avarias (Fonte: Canuto, 2009)

Ainda no âmbito dos custos definidos pelo tipo de manutenção, Stevenson (2002) diz que a redução de custos deve ser obtida através do balanço ótimo entre a manutenção corretiva e manutenção preventiva. Assim, o gestor da manutenção terá de analisar a melhor relação entre a capacidade de financiamento e opção de não financiar um dado programa de manutenção. A figura 11 ilustra a relação descrita por Stevenson em 2002.

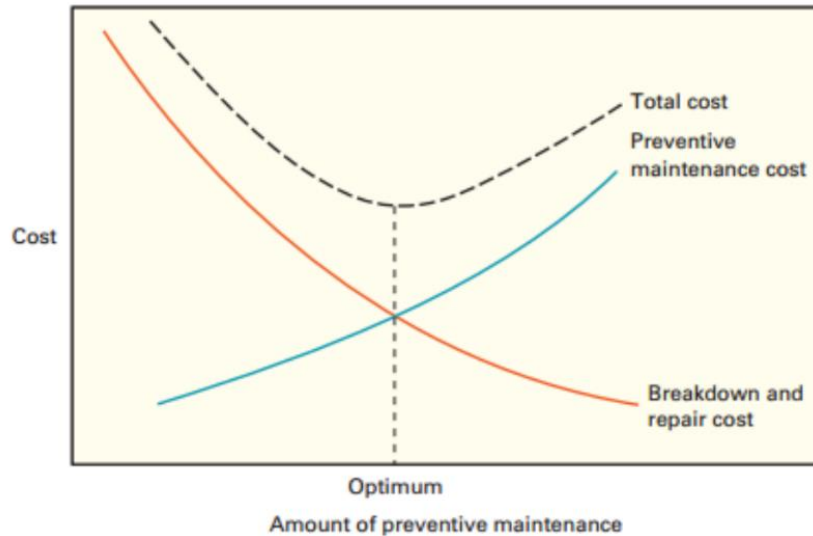


Figura 11 - Custo total da manutenção em função da manutenção preventiva e corretiva (Fonte: Stevenson, 2002)

Assim sendo, Murty e Naikan (1995) realizaram uma nova análise dos custos da manutenção e apresentam uma inter-relação entre a disponibilidade operacional correspondente a um valor maior que zero e menor que uma unidade, por forma a determinação do ponto ótimo. A figura 12 ilustra a supramencionada inter-relação através de um referencial que explica a disponibilidade em função do lucro e o custo da manutenção ao longo destas variáveis.

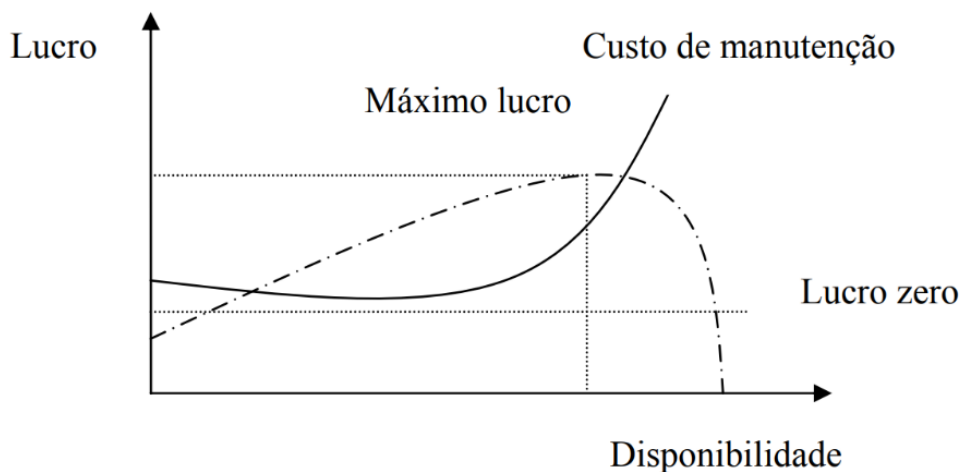


Figura 12 - Inter-relação entre disponibilidade e lucro (Fonte: Canuto, 2009)

Por fim, torna-se evidente a necessidade de realizar a manutenção dos ativos físicos, contudo, nem todas as organizações realizam uma manutenção adequada dos seus equipamentos. Deste modo, foi realizado um relatório na Universidade de Wisconsin-Madison sobre os resultados de um projeto de investigação que documenta a relação custo-eficácia da realização da manutenção (Blanchard et al., 1995). No decorrer do referido projeto foram identificadas três barreiras principais para a possibilidade de realizar a manutenção, que são:

- Uma comunicação inadequada;
- Existência de duas culturas distintas:
 - Centrada na construção/produção;
 - Centrada na utilização ou manutenção;
- Um equívoco da relação custo e valor

2.2.4 Indicadores de desempenho da manutenção

William Edwards Deming, um dos pioneiros na implementação da Qualidade Total na gestão empresarial, diz que “não se gere o que não se mede, não se mede o que não se define, não se define o que não se entende, não há sucesso no que não se gere”. De facto, este raciocínio filosófico permite mostrar a importância da existência de indicadores, visto que, estes permitem avaliar progressos de ações e, também, auxiliar na tomada de decisões por partes dos gestores.

Na verdade, os indicadores servem para monitorizar o desempenho, tratando-se de uma característica ou de um parâmetro, enquanto os objetivos são as metas, ou seja, os níveis que se estabelecem com desafios (Branco, 2008). Os indicadores são métricas que permitem controlar o desempenho das ações, isto é, a eficácia e a eficiência dos processos estabelecidos.

Para Cruz (2009) os indicadores têm de estar ao serviço dos objetivos, medindo o seu desempenho para se poder controlar a organização. Esta visão indica que os indicadores, para além de medirem o desempenho, têm um papel ativo na gestão, pois é através deles que é possível avaliar processos e tomar decisões que permitam que a organização cumpra os objetivos estabelecidos estrategicamente.

De acordo com Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR, 2003), através da norma espanhola UNE 66175:2003 conhecida como um guia para a implementação de um sistema de indicadores, os objetivos derivam da visão e da estratégia da organização, permitindo, assim, estabelecer metas para que seja possível

alcançar estes objetivos. Desta forma, os objetivos podem ser divididos em diversos níveis, sendo que, nível 1 é o maior e seguintes níveis advêm do anterior.

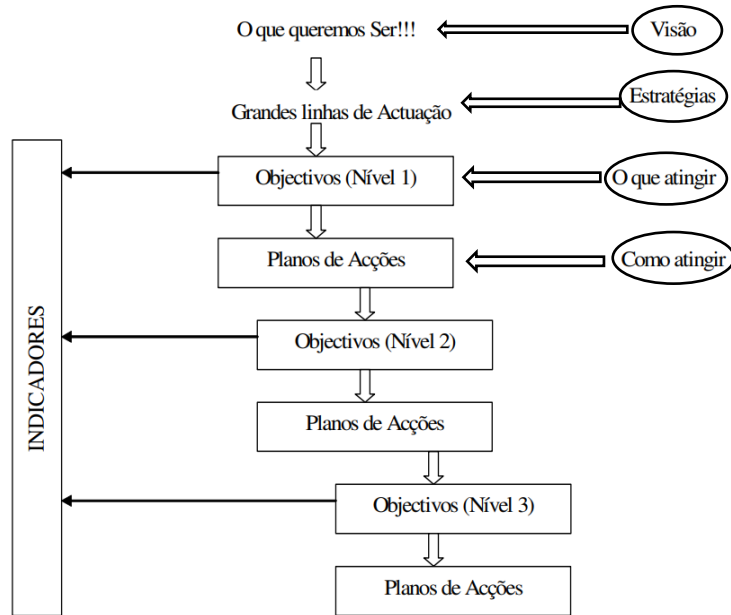


Figura 13 - Sistema estrutural de objetivos (Fonte: Neves, 2012)

Por último, é possível afirmar que cada indicador está associado a cada nível de objetivos. Assim, a figura 13 ilustra a esquematização o sistema definido pela norma UNE 66175:2003 onde estabelece o objetivo 1 como estratégico e os objetivos 2 e 3 como objetivos operacionais (Neves, 2012).

2.2.5 Níveis da manutenção

O sucesso para a gestão dos ativos físicos de uma organização centra-se em definir uma rotina de manutenção ativa e periódica independentemente da política de manutenção que é empregue, a qual varia de acordo com a situação e objetivos de cada organização. Além dos tipos de manutenção existentes, a estratégia de manutenção tem de entender a existência de diferentes níveis de manutenção e que estes variam de acordo com a complexidade da manutenção e a profundidade das tarefas executadas.

Segundo a Association Française de Normalisation (AFNOR, 2016), os trabalhos de manutenção são divididos em 5 níveis distintos e executados por entidades diferentes de acordo com o seu conhecimento técnico ou experiência nos trabalhos realizados. A tabela 3 ilustra diversas características da manutenção de acordo com o nível de manutenção em questão.

Tabela 3 - Níveis de manutenção (Fonte: Adaptado de AFNOR, 2002)

| Nível de manutenção | Nível das ações | Ferramenta utilizada | Executante | Nível de formação | Risco do trabalho |
|---------------------|--|--|---|--|--|
| Nível 1 | Simple | Existência na fábrica, podendo até nem ser necessárias | Operador do equipamento | mínimo ou inexistente | Não representa |
| Nível 2 | Exigem procedimentos Simple | Ferramentas básicas e de medição | Técnico habilitado | Treino básico (Qualificação e experiência) | Existe potencial risco para o trabalhador |
| Nível 3 | Procedimentos complexos | Ferramenta específica | Técnico especializado | Especializado | Risco considerável para a produção e operador |
| Nível 4 | Trabalhos complexos | Tecnologias específicas | Equipa de técnica | Elevado nível de formação | Risco elevado para a produção e operador |
| Nível 5 | Trabalhos extremamente complexos e específicos | Tecnologia específica e especial | Equipa completa de manutenção polivalente ou subcontratados | Nível de formação elevado e polivalente | Risco muito elevado para a produção e operador |

Assim, o primeiro nível de manutenção representa ações de regulamentação, controlos e inspeções determinados pelo fabricante, onde o operador tem acesso aos manuais de instrução para executar os trabalhos. Este nível prevê trabalhos sem qualquer complexidade, designadamente, a substituição de alguns componentes, sendo que, não existe a necessidade de desmontagens ou intervenções excessivas. Alguns exemplos de trabalhos deste nível são a lubrificação diária, o controlo e limpeza de filtros e outros componentes ou substituição de baterias, fluídos, líquidos refrigerantes e cabos.

Quanto ao nível 2, os trabalhos realizados estão associados a certos procedimentos, embora com baixa complexidade associada. Estes trabalhos são da responsabilidade do pessoal da manutenção e a sua natureza é, maioritariamente, controlo de parâmetros de funcionamentos, controlo de desempenho ou reparações através da substituição de elementos *standard*.

No nível 3 de manutenção, as operações a realizar são de carácter preventivo, que requerem procedimentos complexos, e de carácter corretivo simples. As tarefas têm instruções técnicas detalhadas e centram-se na identificação e diagnóstico de avarias, reparações por troca de componentes funcionais e reparações mecânicas menores.

O nível 4 de manutenção requer trabalhos mais complexos que o nível anterior, sendo estes caracterizados pela sua complexidade e índole preventiva e corretiva. Este nível de manutenção integra trabalhos como reparações especializadas, revisões parciais ou gerais que não requeiram a desmontagem completa da máquina.

Por fim, nível 5, é o último nível e, por isso, o mais complexo e centra-se no tipo de manutenção corretiva onde os trabalhos a realizar são maioritariamente de renovação ou reconstrução de um dado bem. Assim, os trabalhos são na ordem de revisões gerais com desmontagem integral dos bens e o seu acondicionamento.

2.2.6 Gestão da manutenção

A gestão aos vários níveis é um dos pilares modernos de qualquer organização que permite um controlo dos objetivos por forma a alcançar a visão estratégica estabelecida por uma determinada organização.

A gestão da manutenção é a forma como os recursos financeiros, humanos ou materiais são utilizados por forma a alcançar os objetivos estabelecidos. Atualmente, a gestão da manutenção está integrada, de forma inevitável, com os objetivos estratégicos de uma determinada organização.

De facto, a gestão da manutenção engloba o conjunto de atividades da gestão que determinam os objetivos, a estratégia e as responsabilidades respeitantes à manutenção. Os objetivos da gestão são implementados por meios como o planeamento, o controlo e a supervisão da manutenção (Instituto Português da Qualidade, 2007).

É incontornável a importância da manutenção e do gestor da manutenção. Este tem um papel fundamental de encontrar a maneira ótima de relacionar fatores como planeamento destinados aos ativos físicos, normalmente pela produção, encontrar o tipo de manutenção mais adequado a cada ativo físico, definir o nível de manutenção a realizar e, também, definir o número de elementos e o material necessário, tendo sempre de considerar todos os fatores económicos envolvidos. De facto, de acordo com Mouta (2011), a gestão da manutenção consiste em estabelecer um ponto de equilíbrio entre o conjunto das ações destinadas a encontrar e a situar o nível da manutenção desejada/necessária.

O gestor da manutenção desempenha um papel central na disponibilidade dos equipamentos e representa um elevado número de funções. Na execução destas funções, o gestor da manutenção tem de ter em consideração os seguintes fatores (Association Française de Normalisation, 2016):

- empresa;
- pessoal da manutenção – Recursos Humanos;
- avarias;
- trabalhos de manutenção;

- gestão de sobressalentes;
- orçamentos e os custos – vertente financeira;
- política de manutenção;
- informática e a normalização.

De facto, na amplitude das competências e ações do gestor da manutenção, este deve ter em consideração os seguintes pontos (Takahashi & Osada, 1993):

- diminuir custos referentes a aquisições de equipamentos desnecessários;
- tirar o maior rendimento possível dos equipamentos existentes através da máxima utilização;
- diminuir o tempo que cada ativo físico se encontra parado disponibilizando-o mais tempo para a produção;
- garantir a qualidade do produto, através do uso do equipamento;
- reduzir a mão de obra referente à manutenção através da otimização e seleção dos tipos de manutenção;
- reduzir os custos de energia e de material através da aquisição de novos ativos físicos com melhor eficiência.

O gestor da manutenção tem à sua carga a enorme responsabilidade de gerir os ativos físicos que compõem uma determinada organização. Ao longo dos anos percebeu-se que o gestor da manutenção assume um papel central na organização, que traz cada vez mais responsabilidades e funções. Na verdade, os gestores de manutenção estão sujeitos cada vez mais a diversos desafios, dando particular destaque aos seguintes (Sena, 2001):

- Seleção de estratégias e técnicas de manutenção de fácil e rápida aplicação;
- Cumprimento das expectativas crescentes da administração das organizações;
- Transformação da manutenção num fator de qualidade e de valor para a empresa;
- Participação da função manutenção num sistema integrado da organização;
- Otimização dos custos de manutenção numa perspetiva de os transformar em centros de lucro (criação de valor).

No entanto, com o avanço tecnológico e digital os sistemas computadorizados adquiriram um papel preponderante no auxílio ao gestor da manutenção através da ferramenta conhecida por *Computerized Maintenance Management System* (CMMS) ou em português por “Sistema de Gestão da Manutenção Computorizado”.

Aliás, Roy (1998) dá especial destaque ao sistema de gestão da manutenção e menciona que este atua como recurso centralizado de dados. Os dados integram os seguintes elementos:

- os equipamentos;
- as ordens de trabalho;
- a manutenção preventiva;
- o histórico;
- a aquisição de materiais;
- as instruções de segurança;
- o controlo dos custos;
- o orçamento.

Este tipo de sistema permite fazer uma interligação de todos os dados associados aos ativos físicos com as competências da manutenção, o que permite um controlo integrado de todas as ações e uma otimização dos recursos empenhados, sejam humanos ou materiais. Deste modo, estes tipos de *softwares* colaboram com o processo da manutenção dos ativos físicos e, de forma geral, encarregam-se dos seguintes aspetos (Canuto, 2009):

- Emissão de ordens de trabalho;
- Controlo da manutenção preventiva;
- Gestão dos ativos físicos;
- Gestão e controlo de materiais.

Por fim, além de colaborar para ultrapassar os desafios, permite melhorar os programas de manutenção na sua máxima extensão, isto é, influencia positivamente o controlo de todas as fases do processo e colabora com o gestor de manutenção nas ações necessárias para a melhoria do mesmo. Na verdade, de acordo com Cato e Mobley (2001) a importância do CMMS centra-se essencialmente na eficiência e eficácia do planeamento e na programação das operações de manutenção para maximizar o tempo de funcionamento (*uptime*) dos equipamentos produtivos e a carga de trabalho requerido (*workload*).

2.3 Fiabilidade na manutenção

2.3.1 Teoria da fiabilidade

A palavra fiabilidade ganhou enorme relevância com o aumento da competitividade do mercado, pois a fiabilidade é um fator chave e diferenciador nos tempos modernos. Na verdade, pode ser comumente descrita como a capacidade que um componente tem em não falhar em um determinado período.

Com efeito, a Instituto Português da Qualidade (2007) define a fiabilidade como a aptidão que um determinado bem tem para cumprir uma função requerida, sob determinadas condições, durante um dado intervalo de tempo. Para além da dependência em função do tempo, Ireson et al. (1995) refere que é possível quantificar a fiabilidade em função de ciclos de funcionamento ou de acontecimentos. Este tipo de quantificação permite uma adaptação funcional do modelo convencional, de cálculo de fiabilidade, a casos específicos.

De acordo com Silva (2016) existem três principais aspetos na definição da fiabilidade que são a função, o tempo e as condições de utilização, pois cada sistema é projetado para realizar determinada tarefa durante um período específico, tendo em conta determinada condição de funcionamento.

Sendo o conceito de fiabilidade abrangente, de forma macro, podemos considerar que existem dois tipos diferentes de fiabilidade que são: a intrínseca e a extrínseca (Serrano, 2009). A primeira, intrínseca, é determinada a partir de testes realizados pelo fabricante sendo independentes da aplicação em um contexto real. Contrariamente, a extrínseca é obtida a partir da aplicação real sendo determinada através de dados de utilização pelos utilizadores.

Antes de abordar as definições principais de fiabilidade, é importante definir o que são sistemas reparáveis e não reparáveis. Os sistemas reparáveis, como o próprio nome indica, são sistemas que após avaria são possíveis de ser recuperados de forma a cumprir a função que estão destinados, através de ações de manutenção. Ao invés destes, os sistemas não reparáveis são aqueles cuja avaria dita o fim do seu normal funcionamento e não é possível recuperar com ações de manutenção.

Os modelos matemáticos aplicados na análise de fiabilidade recorrem às ferramentas de tratamento estatístico dos dados (Silva, 2016). Deste modo, matematicamente, a função fiabilidade é representa-se pela letra R (do inglês, *Reliability*).

Existe uma relação muito forte entre a fiabilidade e a falha. Para se entender matematicamente a fiabilidade é necessário entender os seguintes conceitos:

- Probabilidade de falha (F): de acordo com Machado (2014), a “probabilidade acumulada de falha ou simplesmente probabilidade de falha é definida pelo número de componentes que falham num determinado intervalo de tempo t”. Sendo esta descrita pela equação 1.

$$F = \frac{N^{\circ} \text{ de componentes que falharam } (t)}{N^{\circ} \text{ total de componentes}} \quad (1)$$

- Função densidade de probabilidade de falha (f): Na prática esta função representa a percentagem ou taxa de elementos que falharam por unidade de tempo, no instante t, tendo em conta o número de componentes inicial e relacionando-os (Silva, 2016). De facto, matematicamente, a função densidade de probabilidade de falha e a função de falha relacionam-se conforme ilustra a equação 2.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2)$$

De forma consequente, a partir da equação 2, podemos definir a probabilidade de falha pela forma como expressa a equação 3.

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (3)$$

Assim, a fiabilidade (R), é tida como a probabilidade de o item em causa cumprir a função para que foi projetado, de acordo com as especificações a que está sujeito em função do tempo e de condições de serviço. Deste modo, a expressão tipo que é universalmente aceite e amplamente utilizada nos normativos é ilustrada na equação 4 (Machado, 2014).

$$R(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (4)$$

Ainda, relativamente à fiabilidade, esta pode-se relacionar com a probabilidade de falha. Esta é uma relação antagónica, isto é, quanto maior é a fiabilidade, menor é a probabilidade de falha e vice-versa, como ilustra a equação 5.

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (5)$$

Desta forma, a figura 14 explana graficamente a relação antagónica entre a fiabilidade (R) e probabilidade de falha (F). Nesta figura, é possível observar que quando a fiabilidade é 1, a probabilidade de falha é 0 e, inversamente, quando a fiabilidade cresce para 0 a probabilidade de falha cresce para 1.

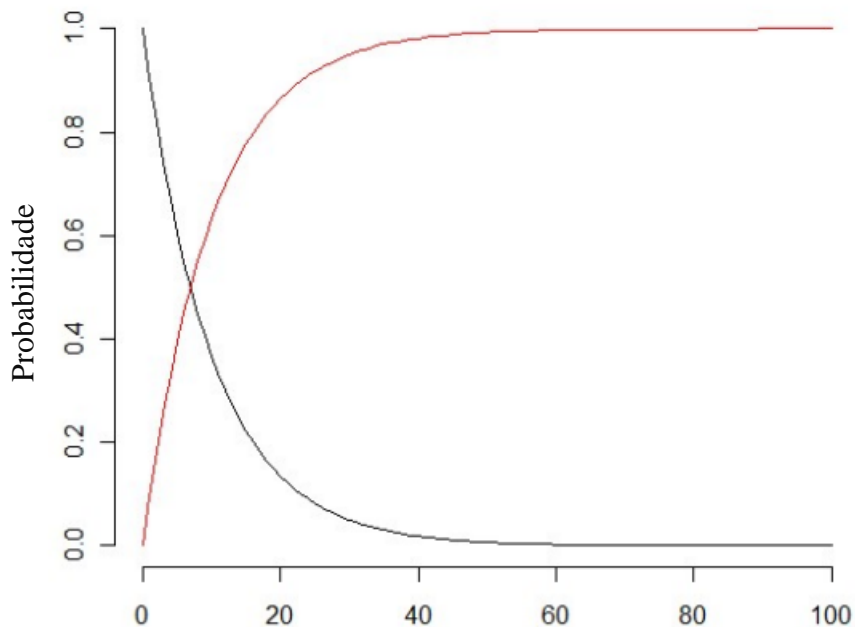


Figura 14 - Relação antagónica entre a fiabilidade e a probabilidade de falha (Fonte: Placca, 2017)

Derivado da equação 5 e integrando a equação 3, conseguimos retirar as seguintes relações entre a fiabilidade e a probabilidade de falha, conforme exterioriza a equação 6.

$$R(t) = 1 - F(t) \Leftrightarrow R(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{+\infty} f(t) dt \quad (6)$$

A figura 15 ilustra graficamente a função de densidade de probabilidade de falha no tempo. Nesta mesma figura é possível aferir a relação entre a densidade de probabilidade de falha (f), a probabilidade de falha (F) e a fiabilidade (R).

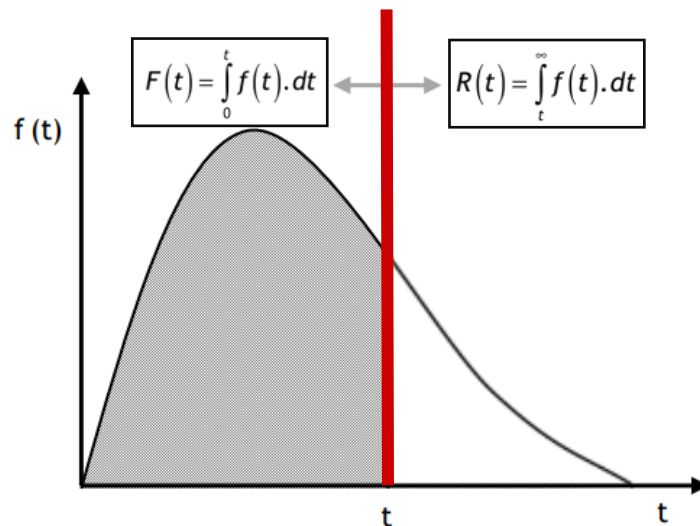


Figura 15 - Relação entre a densidade de probabilidade de falha e o tempo

Por fim, a taxa de falha ou taxa de avarias (λ) é um conceito que só se aplica a bens reparáveis quando estes são considerados de forma isolada e, de uma forma genérica, é uma análise instantânea que representa a relação entre a taxa a que os componentes falham, por unidade de tempo, em um determinado instante t , e o número de componentes que sobrevivem até esse instante t (Placca, 2017; Sobral, 2010). Matematicamente, a taxa de falha é definida pela equação 7.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (7)$$

Assim, a partir da equação anterior é possível obter a equação da função da fiabilidade geral que adota a forma da equação 8.

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = e^{-\lambda t} \quad (8)$$

A representação gráfica da taxa de falha (λ) ao longo do tempo permite a edificação da conhecida “curva da banheira”, que adquire este nome devido ao seu formato adotar a forma de uma banheira. Este gráfico permite destacar 3 fases distintas:

- Fase de mortalidade infantil – ilustra a fase em que a taxa de avaria é descendente ao longo do tempo;
- Fase da vida útil – representa a fase onde a taxa de falhas é constante ao longo do tempo e é conhecido como fase de vida útil;
- Fase de desgaste – exibe a fase onde a taxa de avarias é crescente, também conhecida como fase de desgaste.

Ainda, dependendo do tipo de equipamento analisado podemos ter diversos tipos de curvas onde, a maioria, adota o formato de “U”. A figura 16 ilustra graficamente a função taxa de avarias em função do tempo de três equipamentos distintos e exhibe as fases supramencionadas.

Por fim, o comportamento da taxa de avaria ao longo do tempo para bens reparáveis, pode ser influenciado na fase de vida útil, principalmente pela política de manutenção utilizada e, ainda, pela solicitação que é atribuída ao equipamento e ao controle de qualidade associado. Assim, a figura 17 ilustra o comportamento da curva da banheira através da variação dos fatores supramencionados.

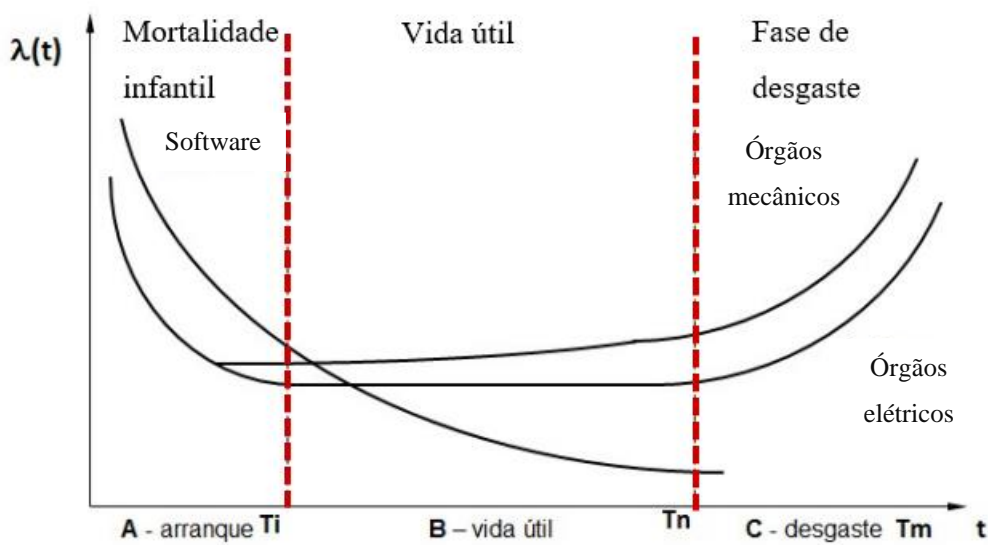


Figura 17 - Taxa de falha de 3 equipamentos distintos (Fonte: Placca, 2017)

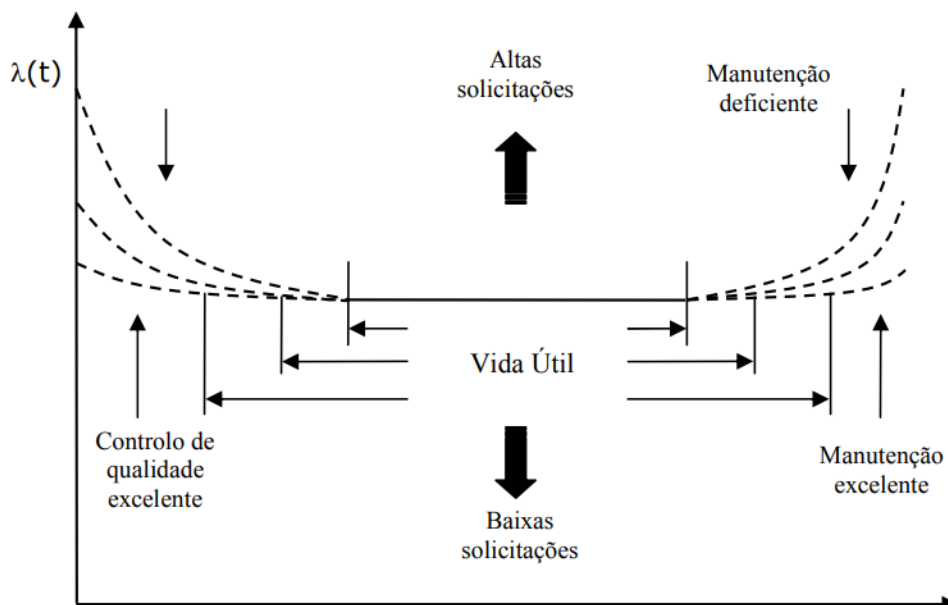


Figura 16 - Influência de alguns fatores na taxa de avarias (Fonte: Sobral, 2010)

2.3.2 Indicadores de desempenho da fiabilidade

O indicador de desempenho permite vincar os resultados obtidos por uma organização e o desempenho de um determinado processo. Aliás, de acordo com Ferreira (2020), “a implementação de indicadores de desempenho pelas diferentes organizações tem como objetivos fulcrais a ênfase de resultados, responsabilidades e metas, uma vez que permitirão conhecer de forma consistente e parametrizada qual o desempenho da organização num determinado período”.

Os indicadores são estabelecidos com o objetivo de dar suporte à gestão, de forma a atingir a excelência da manutenção. Aliás, o desempenho da manutenção é o resultado da utilização eficiente dos recursos para manter a condição de um bem, de forma a cumprir a função requerida (Instituto Português da Qualidade, 2009). Os indicadores medem de forma analítica o nível de desenvolvimento de uma determinada ação e apoio na gestão e coordenação das atividades. Na prática, são os indicadores que permitem monitorizar as ações implementadas e perceber se estas estão a verter o resultado pretendido.

Neste sentido, o Instituto Português da Qualidade (2009), através da norma NP EN ISO 9000:2015, define que os indicadores de desempenho têm como meta permitir que as interpretações sejam mais objetivas, de acordo com a estratégia da organização.

Os indicadores referenciados pela organização para controlar e medir o desempenho designam-se por Indicadores Chave de Desempenho, ICD (em inglês, KPIs – *Key Performance Indicators*) e normalmente são agrupados num Quadro de Bordo (ou *Balanced Scorecard*) onde podem ser analisados e correlacionados uns com os outros.

De seguida, apresento um conjunto de KPIs que são amplamente utilizados pela indústria e pelo universo académico no âmbito da manutenção e gestão da manutenção:

- *Mean Time Between Failures* (MTBF): traduzindo à letra este indicador representa o tempo médio decorrido entre falhas. Analiticamente é calculado em horas e quanto maior for o seu valor, melhor é. Este indicador é apenas utilizado em componentes reparáveis. Por fim, a equação 9 ilustra a forma de cálculo do MTBF.

$$MTBF = \frac{\text{Tempo total de funcionamento}}{\text{Número de avarias}} \quad (9)$$

- *Mean Time To Repair (MTTR)*: este indicador representa o tempo médio de reparação de avarias e é apresentado sobre a unidade de horas. Este indicador detém a forma expressa na equação 10.

$$MTTR = \frac{\text{Tempo total de reparação}}{\text{Número de avarias}} \quad (10)$$

- *Mean Waiting Time (MWT)*: de acordo com a própria tradução é o tempo médio de espera. Este conceito compreende todo o período em que o equipamento está imobilizado por avaria até ao momento em que é iniciada a intervenção, conforme ilustra a equação 11. Os fatores que influenciam este KPI, por norma, são a má sincronização entre a produção e a manutenção, falta de recursos ou carga burocrática de uma organização (Cabral, 2006).

$$MWT = \frac{\text{Tempo total de espera}}{\text{Número de avarias}} \quad (11)$$

- *Mean Down Time (MDT)*: é o tempo médio de imobilização de um equipamento. Na prática é a soma dos indicadores MTTR e MWT, conforme exterioriza a equação 12.

$$MDT = MTTR + MWT \quad (12)$$

Assim, por forma a facilitar a compreensão dos indicadores de desempenho, ilustro a figura 18 que representa graficamente os KPI de MTBF, MTTR, MWT e MDT.

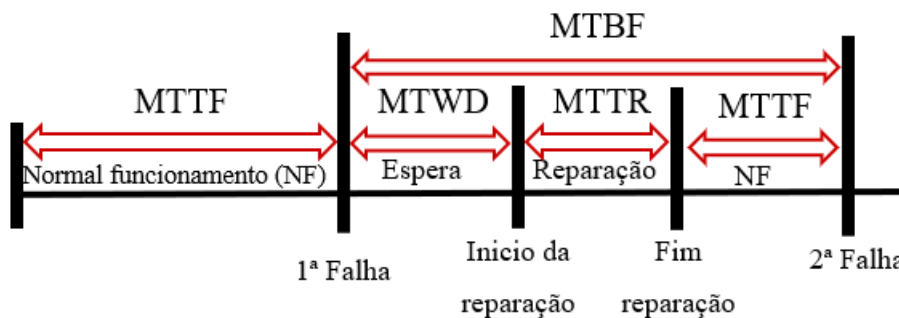


Figura 18 - Esquemática dos indicadores de desempenho

Ainda, a figura 19 exterioriza um exemplo dos estados de funcionamento de um determinado ativo físico e permite complementar a figura anterior na compreensão dos KPI mencionado anteriormente.

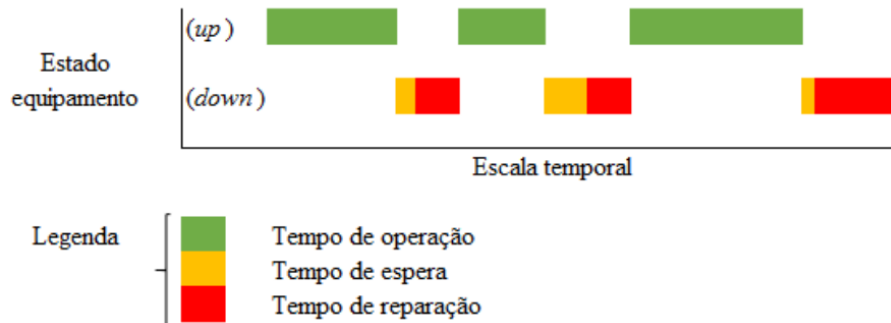


Figura 19 - Exemplo dos estados de funcionamento (Fonte: Pinto, 2013)

Por fim, a disponibilidade (Disp) é um indicador que permite ilustrar o tempo que o equipamento está disponível para trabalhar em percentagem (Nina, 2016). Assim, matematicamente, a equação que permite calcular o indicador de disponibilidade encontra-se explanada na equação 13.

$$Disp = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MWT} \times 100 (\%) \quad (13)$$

2.3.3 Metodologias que visam a melhoria da fiabilidade operacional

À medida que a fiabilidade ganhou destaque no seio da manutenção foram realizados diversos estudos e avaliados vários parâmetros de desempenho por forma a perceber de que modo é que certas filosofias manipulariam a fiabilidade operacional de um determinado ativo físico.

Entre as inúmeras filosofias que visam melhorar a flexibilidade operacional de um sistema, Canuto (2009) considera que as que mais impulsionam a fiabilidade na manutenção são as seguintes:

- RCM – *Reliability Centered Manintenance*;
- TPM – *Total Productive Maintenance*;
- RAMS – *Reliability, Availability, Maintainability and Safety*;
- ROM – *Results Oriented Maintenance*;

Ainda, as filosofias descritas são suportadas por diversas técnicas e metodologias que permitem alcançar os objetivos definidos. Assim, estas são as seguintes (Canuto, 2009):

- CBM – *Condition Based Maintenance*;
- RBI – *Reliability Based Inspection*;
- DOM – *Design-Out Maintenance*;
- FBM – *Failure Based Maintenance*;
- UBM/TBM – *Use or Time Based Maintenance*.

Ainda, no subcapítulo 2.4 irá ser abordada a filosofia RCM, sendo esta a filosofia que selecionei como base para a edificação do modelo apresentado no capítulo 3. Por fim, no capítulo 2.5 é descrita a filosofia CBM, sendo esta um dos pilares que irá contribuir para ultrapassar algumas das limitações que o sistema FRACA apresenta.

2.4 Reliability Centered Manintenance (RCM)

2.4.1 Enquadramento da filosofia RCM

No decorrer do século XX, a maior parte das organizações adotaram a manutenção preventiva como a sua filosofia de manutenção. Nesse mesmo período, a indústria aeronáutica promoveu uma abordagem diferente e desenvolveu um processo de manutenção baseado nas funções de cada sistema, consequência de falhas, e modos de falha. Nos anos 80 e 90, a marinha norte-americana (*US Navy*) expandiu o âmbito da filosofia de manutenção centrada na fiabilidade (*Reliability Centered Manintenance* – RCM) e aplicou a meios navais de superfície e subsuperfície. Ao longo de vários anos de aplicação e após validar a enorme carga de benefícios associada, esta filosofia ocupou um lugar de destaque na manutenção da *US Navy* que declarou os requisitos da RCM e da Monitorização Baseada na Condição (*Condition Based Maintenance* - CBM) como parte das especificações de produção (National Aeronautics and Space Administration, 2008).

Assim, sendo a RCM uma teoria relativamente moderna na manutenção e com uma enorme projeção nas grandes organizações públicas da defesa nacional americana, grande parte da indústria americana e, posteriormente, mundial investigaram e procuraram conhecer esta filosofia.

Deste modo, importa entender qual é o âmbito desta filosofia RCM. Nowlan e Heap (1978), conhecidos como uns dos principais impulsionadores da supramencionada

filosofia, referem que o RCM é utilizado para determinar o que deve ser feito, ou não, para assegurar que qualquer componente cumpra as funções para que foi projetado. Assim, ao contrário do conceito tradicional que se centra na preservação física dos bens, o RCM centra-se na preservação das funções dos ativos físicos. De facto, os princípios e ferramentas da *Reliability Centered Maintenance* são simples e resumem-se ao investimento de tempo e dinheiro na criação e implementação de iniciativas de melhoria de gestão de ativos e fiabilidade (Sifonte & Reyes-Picknell, 2017). Estas ações, permitem evitar avarias inesperadas, interrupções, exposições de segurança e custos para atender às metas de desempenho estabelecidas.

Aliás, Moubray (1999) faz referência à metodologia RCM como sendo um processo utilizado para determinar o que deve ser feito por forma a assegurar que qualquer ativo físico continua a cumprir o que foi projetado para fazer. Ainda, é mencionado pela National Aeronautics and Space Administration (2008) que o objetivo deste tipo de abordagem é reduzir ao mínimo o custo do ciclo de vida (*Life-Cycle Cost - LCC*) de um ativo físico, continuando a permitir que este funcione como pretendido, com a fiabilidade e disponibilidade necessárias.

A resposta a estas perguntas permite aplicar a metodologia de uma forma mais intuitiva e prática, onde é perceptível a utilização das ferramentas que a integram. A supramencionada análise, permite sustentar a utilização da metodologia uma vez que esta terá de ter uma cuidadosa justificação técnica e uma abrangente análise económica na sua génese. Na verdade, caso o RCM seja aplicado de forma correta, é possível obter os seguintes benefícios (Moubray, 1999):

- Aumento da vida útil dos equipamentos críticos;
- Maior segurança humana e proteção ambiental;
- Melhor desempenho operacional;
- Otimização nos custos da manutenção;
- Criação de um histórico completo sobre a manutenção;
- Maior motivação das equipas de manutenção e operação;
- Aumento da eficiência das equipas de manutenção.

A RCM recolhe dados a partir dos resultados alcançados e alimenta estes dados para melhorar a produção e futuras manutenções. Efetivamente, este ciclo é um elemento-chave para a implementação de um programa RCM. Assim, a análise do RCM terá de ter

um cuidado especial na abordagem das seguintes questões (National Aeronautics and Space Administration, 2008):

- Quais são as funções de um sistema ou equipamento?
- Que falhas funcionais são prováveis de ocorrer?
- Quais são as consequências prováveis destas falhas funcionais?
- O que pode ser feito para reduzir a probabilidade da falha, identificar o início da falha, ou reduzir as consequências da falha?

Quanto aos resultados possíveis, o processo de análise da manutenção tem apenas quatro resultados possíveis (National Aeronautics and Space Administration, 2008):

- Realizar ações baseadas no intervalo (tempo ou ciclo).
- Realizar ações baseadas em condições (CBM dirigidas).
- Não realizar nenhuma ação e optar pela reparação após falha.
- Determinar nenhuma ação de manutenção irá reduzir a probabilidade de falha e falha não é o resultado escolhido (Redesenho ou Redundância).

Por fim, independentemente da técnica utilizada para definir a abordagem de manutenção a utilizar, a abordagem deve ser reavaliada e validada. Assim, a figura 20 ilustra o processo de RCM iterativo racionalizado onde é possível verificar as condições supramencionadas. Ainda, na figura 20, é possível validar que os resultados possíveis de ação no RCM são os quatro mencionados anteriormente.

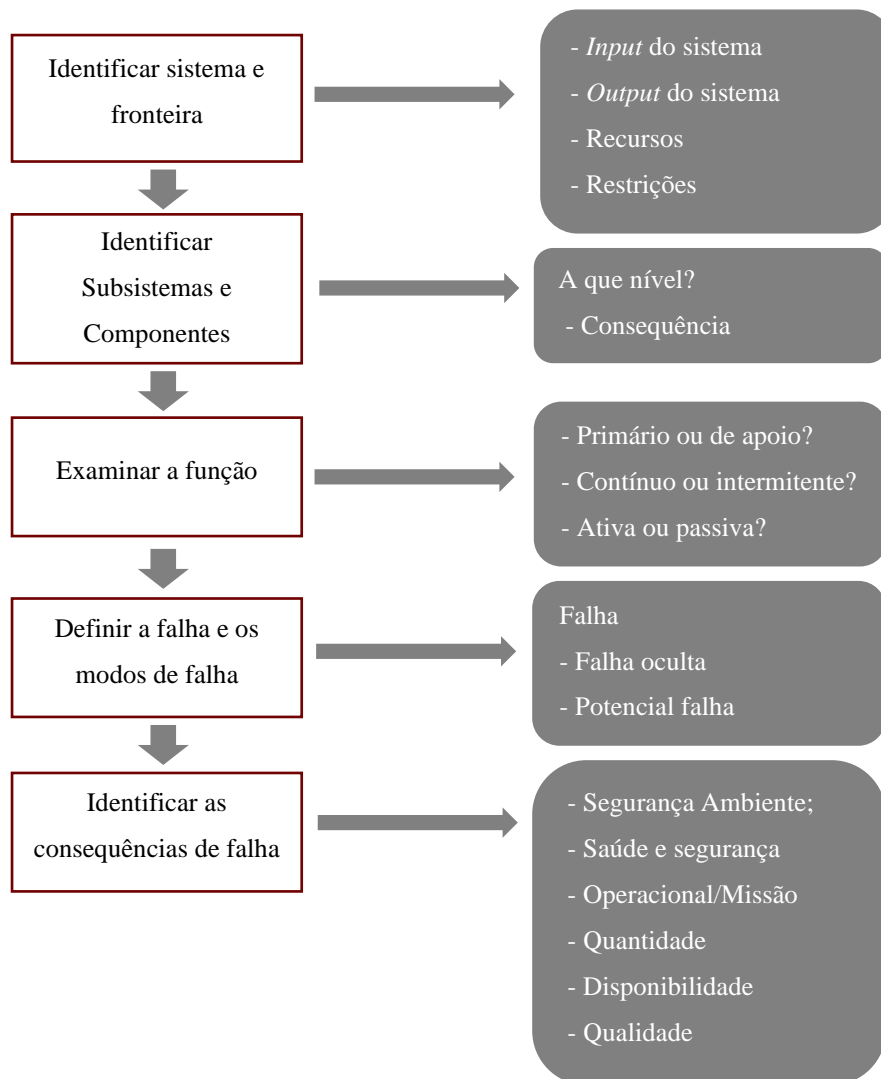


Figura 20 - Processo RCM (Fonte: Adaptado NASA, 2008)

2.4.2 Tipos RCM

A metodologia RCM pode ser implementada e conduzida de várias maneiras, fazendo recursos a diferentes tipos de informação. É importante conhecer os tipos de RCM e perceber os passos básicos para uma implementação efetiva da metodologia.

De uma forma geral, a metodologia é baseada numa rigorosa análise do modo e efeito de falha (FMEA - *Failure Mode and Effect Analysis*), complementada com uma análise matemática da probabilidade de falha com base numa combinação de dados históricos, de intuição, senso comum, dados experimentais e modelações. Assim, é possível afirmar que existem dois tipos de abordagem distintos que são: a rigorosa e intuitiva (National Aeronautics and Space Administration, 2008).

A abordagem rigorosa da RCM, também conhecida como abordagem clássica, é um método documentado e proposto por F. Stanley Nowlan e Howard F. Heap e,

posteriormente, modificado por John Moubray, Anthony M. Smith, Jack Nicholas e outros, que mencionam que esta abordagem produz a documentação mais completa em comparação com a abordagem intuitiva (Canuto, 2009). Na prática, esta abordagem baseia-se principalmente na ferramenta FMEA, descrita no subcapítulo 2.4.6, e inclui a probabilidade de falha e cálculos de fiabilidade do sistema, mas com residual análise dos dados históricos de desempenho. Devido a este facto, a presente abordagem é caracterizada como sendo muito trabalhosa e muitas vezes adia a implementação de tarefas de CBM óbvias (National Aeronautics and Space Administration, 2008).

Na realidade, a supramencionada abordagem assenta numa análise RCM mais formal a cada sistema, subsistema e componente e é normalmente realizada em sistemas novos, únicos e de alto custo. Assim, a abordagem rigorosa raramente é necessária para a maioria dos ativos físicos em que os modos de falhas são bem compreendidos pois, para estes casos, a abordagem mais utilizada é a intuitiva.

Na verdade, a abordagem RCM intuitiva utiliza os mesmos princípios que a abordagem RCM rigorosa, mas reconhece que nem todos os modos de falha serão analisados. Assim, a abordagem intuitiva identifica e implementa tarefas de manutenção baseadas em condições, com as análises mínimas necessárias, sendo que as tarefas de manutenção que representam um baixo valor são eliminadas com base em dados históricos e na experiência dos elementos da Manutenção. Deste modo, a intenção das ações supramencionadas é minimizar o tempo de análise inicial, a fim de ajudar a compensar o custo do desenvolvimento das capacidades de FMEA e de monitorização de condições (National Aeronautics and Space Administration, 2008).

Assim sendo, os erros associados a este tipo de abordagem são introduzidos no processo através da confiança atribuída aos registos históricos e ao fator humano, nomeadamente no conhecimento dos elementos da manutenção, criando assim a possibilidade de não serem detetadas falhas ocultas e de baixas probabilidade.

Naturalmente, dado às suas especificações, a abordagem intuitiva deve ser aplicada quando a função do sistema ou ativo físico é bem compreendida e quando uma falha funcional do sistema ou ativo físico não terá um desfecho associado a perdas de vidas, impacto catastrófico no ambiente ou falha económica da unidade de negócio. Neste caso devemos optar pela abordagem clássica onde é feita uma análise mais exaustiva da conjuntura, tendo em conta qualquer probabilidade de falha.

Por fim, o processo intuitivo requer que pelo menos um indivíduo tenha um conhecimento profundo das várias tecnologias da CBM, uma vez que a análise de condição é um dos fatores-chaves para a aplicação deste tipo de abordagem.

2.4.3 Fundamentos do RCM

Para implementar um sistema é essencial percebermos os fundamentos por detrás da filosofia que o integram. Assim, os fundamentos são a base que sustentam a estrutura da filosofia e a sua aplicação. O RCM como estrutura complexa e ampla, deve assentar em ferramentas e linhas orientadoras sólidas que permitam fiabilizar a sua aplicação.

Deste modo, a NASA (2008) apresentou-se como primeiro organismo a definir os fundamentos do RCM. Assim, no documento que esta publicou em 2008, fez menção às seguintes princípios:

- Orientado para a função: A RCM procura preservar a função do sistema ou do equipamento e não apenas a sua operacionalidade. A produção de redundância permite melhorar a fiabilidade funcional, mas obriga a um aumento do custo do ciclo de vida em termos de aquisição e custos operacionais.
- Orientado para o sistema: A RCM centra-se no todo ao invés de frações, isto é, preocupa-se mais com a manutenção da função do sistema do que com a função de componentes individuais.
- Centrada na Fiabilidade: A RCM trata as estatísticas de falhas de uma forma atuarial. A relação entre a idade de funcionamento e as falhas verificadas é importante. Deste modo, a filosofia procura conhecer a probabilidade condicional de falha em idades específicas.
- Reconhece as limitações de produção: O objetivo da RCM é manter a fiabilidade inerente à fase de produção do equipamento. Na verdade, a manutenção só pode alcançar e manter o nível de fiabilidade do equipamento que é previsto pelo desenho. Assim, a filosofia reconhece que o *feedback* da manutenção pode melhorar o design original e reconhece, também, que muitas vezes existe uma diferença entre a vida útil percebida do *design* e a vida útil intrínseca ou real do *design*.
- Segurança, proteção e economia: Quando se estabelecem prioridades é importante diferenciá-las claramente. O RCM dita que a segurança e a

proteção devem ser asseguradas a qualquer custo. Assim, a relação custo-eficácia do ciclo de vida é um critério terciário.

- A falha apresenta-se como qualquer condição insatisfatória: A falha pode ser ou uma perda de função (a operação cessa) ou uma perda de qualidade aceitável (a operação continua).
- Tarefas de Manutenção explanada em linhas orientadoras ou *Árvore Lógica (Logic Tree)*: Isto proporciona uma abordagem consistente para a manutenção de todo o equipamento. A figura 21 exterioriza o formato de uma árvore logica adaptada da política RCM da NASA (2008);
- As tarefas devem ser aplicáveis: As tarefas devem ser possíveis de realizar no contexto da falha e, também, devem abordar e considerar as características do modo de falha.
- As tarefas têm de ser eficazes: As tarefas devem reduzir a probabilidade de falha e ser rentáveis, isto é, a execução das tarefas definidas deve permitir que as alterações efetuadas resolvam o problema a que se destinam, diminuindo assim a probabilidade de falha.

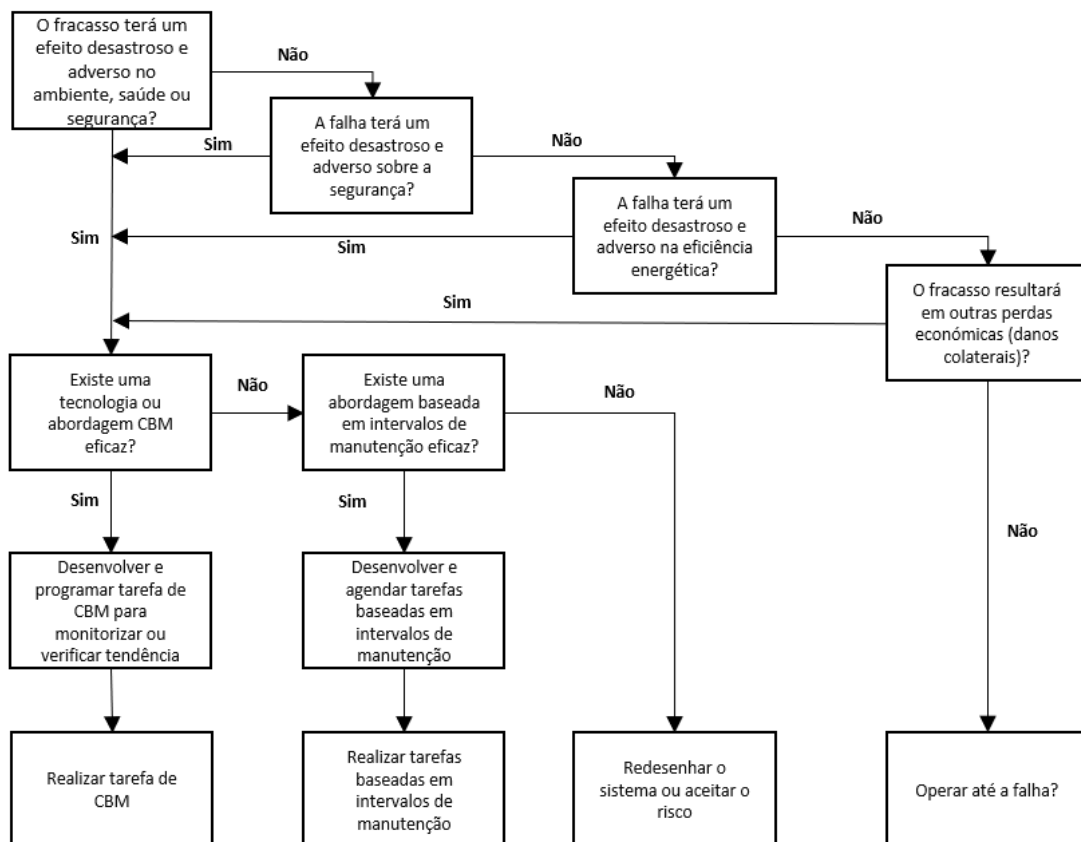


Figura 21 - RCM linhas orientadoras/ Árvore lógica (Fonte: Adaptado NASA, 2008)

2.4.4 Implementação do RCM

Quando analisado, o RCM pode aparentar ser uma filosofia pesada em que se perspectiva um excesso de trabalho agregado à sua implementação, contudo quando feito de forma metódica é acessível e a extensão dos benefícios associados é elevada. Assim, Moubray (1999) afirma que para a implementação da metodologia RCM é necessário responder, através de uma análise crítica, a cada uma das sete perguntas que se segue:

1) Quais são as funções e padrões de desempenho de um ativo físico no seu contexto presente de operação?

2) De que forma ele falha em cumprir as suas funções?

3) O que causa cada falha funcional?

4) O que acontece quando ocorre cada falha?

5) De que forma cada falha importa?

6) O que pode ser feito para predizer ou prevenir cada falha?

7) O que deve ser feito se não for criada uma tarefa proativa apropriada?

Na verdade, o objetivo em responder a estas sete perguntas é tornar a metodologia RCM mais amigável e permitir um menor nível de complexidade na sua aplicação (Bloom, 2005). Assim, a implementação da metodologia RCM sustenta-se em sete passos básicos que são (Smith & Hinchcliffe, 2003):

1) Seleção do sistema e recolha de informações;

2) Definição do limite do sistema;

3) Descrição do sistema e diagrama de blocos funcional;

4) Funções do sistema e falhas funcionais-funções de prevenção;

5) Análise de modo de falha e efeitos (FMEA)-Identificar falha;

6) Análise da causa raiz;

7) Seleção de tarefas - Selecione apenas tarefas preventivas aplicáveis e eficazes.

Na sequência da implementação do programa de RCM, a decisão desta deve ser tomada com base nos seguintes aspetos (National Aeronautics and Space Administration, 2008):

- Consequências do fracasso;
- Probabilidade de fracasso;
- Dados históricos;
- Tolerância ao risco (Crítica da Missão).

Por último, é importante contemplar o que é desejado que um determinado ativo físico faça contexto operacional e se ele é capaz de realizar essas tarefas. Na verdade, esta análise deve ser feita antes de se realizar qualquer ação para que os ativos físicos continuem a desempenhar a sua função (Moubray, 1999).

2.4.5 Falha

É importante abordar a falha de forma integral: os modos de falha, os efeitos da falha, consequências da falha, padrão das falhas, tipos de falhas e definições das falhas. De acordo com a NASA (2008), a falha é a cessação da função ou do desempenho adequado, isto é, deixar de desempenhar as funções para a qual foi projetado.

Na prática, os componentes do sistema podem ser degradados ou mesmo falhar e, ainda assim, não causar uma falha do sistema. Isto é, um sistema ou subsistema pode apresentar uma falha ou perda de rendimento e pode conseguir operar num estado degradado, não implicando que se apresente como falha funcional.

Assim, de acordo com National Aeronautics and Space Administration (2008), a função define a expectativa de desempenho e os seus muitos elementos podem incluir propriedades físicas, desempenho operacional (incluindo tolerâncias de saída) e requisitos de tempo (tais como operação contínua ou disponibilidade limitada exigida). Na prática, a função permite delimitar o normal desempenho de um dado equipamento e mencionar todas características e requisitos desse equipamento.

A falha funcional é definida pela SAE (2009) como o estado em que um determinado ativo físico é incapaz de executar uma função específica, para um nível desejado de desempenho. Na verdade, as falhas funcionais descrevem as várias maneiras pelas quais um sistema ou subsistema pode falhar em atender aos requisitos funcionais projetados para o equipamento (National Aeronautics and Space Administration, 2008).

Neste sentido, para perceber o modo de falha é importante identificar todos os eventos prováveis de causar falha, incluindo aquelas falhas que ocorrem no mesmo equipamento ou similar e, de seguida, listar todos os modos de falha cuja probabilidade de ocorrência seja praticamente nula (Moubray, 1999). De facto, os modos de falha são falhas de equipamentos e componentes específicos que resultam na falha de funcionamento do sistema ou subsistema. Assim, os modos de falha dominantes são os modos de falha responsáveis por uma proporção significativa de todas as falhas do item apresentando-se, assim, como os modos mais comuns de falha (National Aeronautics and Space Administration, 2008).

Por fim, existem seis distintos padrões de probabilidade de falha condicional em função da idade operacional de um ativo, que são (Moubray, 1999; National Aeronautics and Space Administration, 2008):

- Tipo A: Mais conhecida como curva da banheira e é composta por 3 fases distintas. Começa com a fase de mortalidade infantil seguida, com uma forma decrescente, seguida da fase de vida útil do componente que se apresenta como uma probabilidade de falha constante ou gradualmente crescente e, por fim, a fase de fim de vida ou desgaste onde ilustra um crescente aumento da probabilidade de falha condicionada. Um limite de idade pode ser desejável, desde que um grande número de unidades sobreviva à idade em que começa o desgaste;
- Tipo B: Este tipo de curva apresenta uma probabilidade de falha constante ou gradualmente crescente, seguida de uma região de desgaste pronunciado. Na verdade, este tipo de comportamento de probabilidade de falha é típico de pistons de motores;
- Tipo C: Esta curva adota a forma declive gradualmente crescente onde a probabilidade de falha assume essas mesmas características, mas sem desgaste identificável com a idade. Este tipo de curvas é bastante conhecido sistema de motores de turbina;
- Tipo D: Para esta curva a probabilidade de falha caracteriza-se através de uma baixa robustez de falha quando o item é novo ou apenas revisto, seguido de um aumento rápido para um nível relativamente constante;
- Tipo E: Este tipo de curva apresenta uma probabilidade de falha relativamente constante em todas as idades. Para este tipo de equipamentos a curva da probabilidade de falha adota declive de zero ou de tal forma baixo que pode ser considerado residual.
- Tipo F: Esta curva ilustra uma mortalidade infantil, decrescente probabilidade de falha, seguida de uma probabilidade de falha constante ou lentamente crescente. Na verdade, este tipo de curvas é próprio de equipamentos eletrónicos, não obstante, existem outro tipo de equipamentos para além destes a adotar este tipo de forma.

De facto, os tipos de curvas “A” e “B” são típicos de peças simples e consumíveis, tais como pneus, pás do compressor, pastilhas de travão e membros estruturais. No

entanto, a maioria dos itens complexos tem curvas de probabilidade condicional de falha semelhantes aos tipos de curvas “B”, “C”, “D” e “F”.

De modo a facilitar a visualização das curvas anteriormente mencionadas, a figura 22, representa os seis padrões distintos de curvas de probabilidade condicionada de falha em função da idade operacional do equipamento.

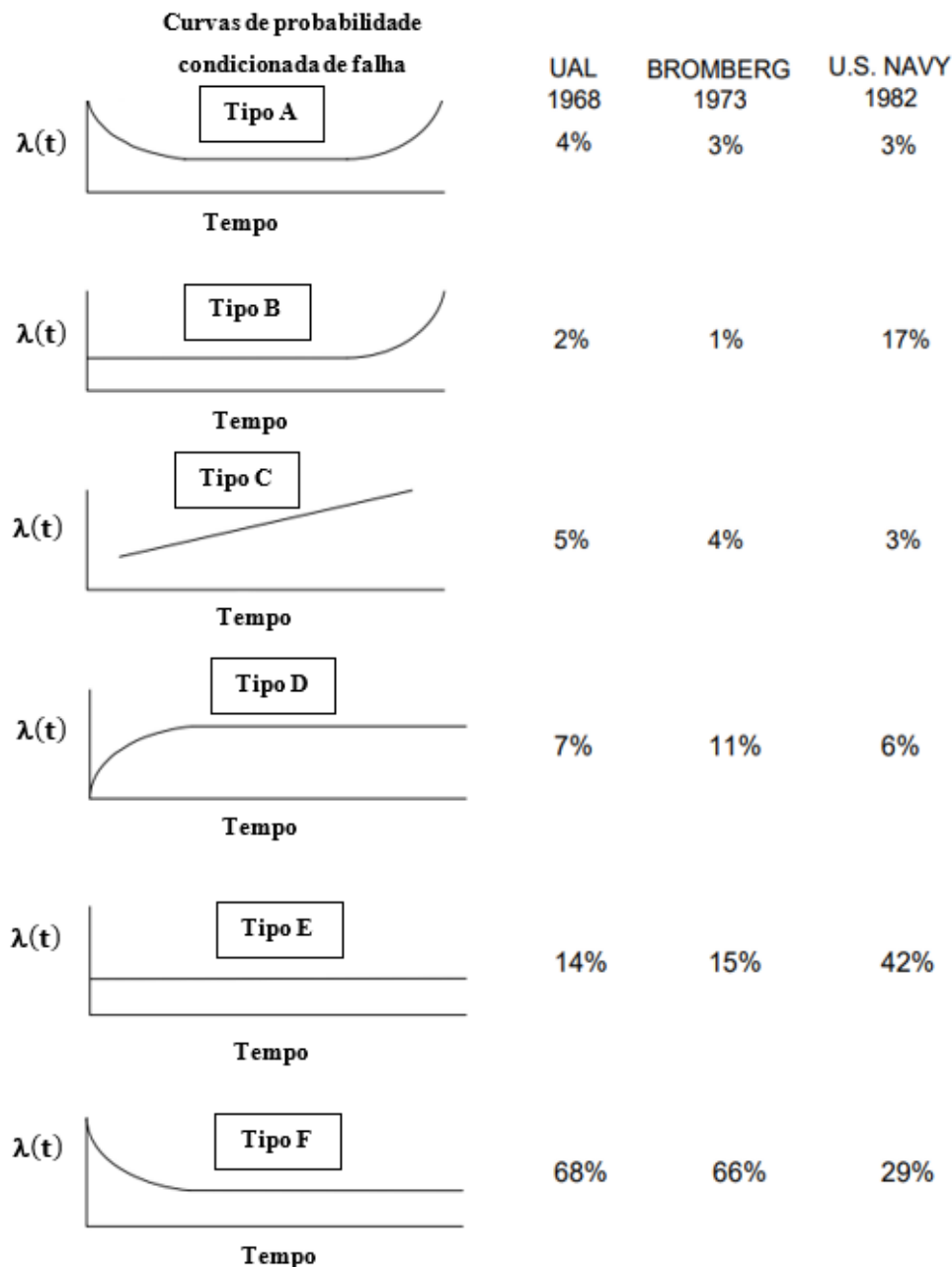


Figura 22 - Padrões de probabilidade de falha condicional em função da idade operacional de um ativo (Fonte: Adaptado de NASA, 2008)

Ainda, conforme ilustra a figura 22, é possível visualizar a probabilidade de falha de cada curva no universo de falhas de 3 grupos distintos, que são a empresa aeronáutica

civil Norte Americana UAL, a *bromberg* na Suécia e a USNavy. Nestes estudos, é possível concluir que os resultados produzidos são bastante semelhantes e que as falhas aleatórias se situam entre os 77 e 92% do total de falhas e as características de falhas relacionadas com a idade para os restantes 8% a 23%.

Por fim, os itens simples e de peça única demonstram frequentemente uma relação direta entre fiabilidade e a idade e, contrariamente a estes, os artigos complexos demonstram frequentemente alguma mortalidade infantil, seguida de um aumento gradual ou permanência constante da probabilidade de falha e não é comum uma acentuada idade de desgaste (Nowlan & Heap, 1978).

2.4.6 Failure Mode and Effects Analysis e Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis

A gestão do ciclo de vida de um ativo físico e, conseqüentemente, a gestão da manutenção do mesmo, são assuntos complexos devido à forma como a falha irá aparecer, quando irá aparecer e que efeitos causará para o sistema e organização. Sendo este o cerne da questão, a filosofia RCM faz recurso à metodologia FMEA por forma a identificar os modos e efeitos das falhas e, a partir destas, reconhecer uma série de variantes que contribuem para a tomada de decisão.

Na verdade, a análise de modo e efeitos de falha (FMEA) é um procedimento de fiabilidade que documenta tudo o que é possível falhar na produção de um sistema, dentro de regras básicas especificadas (Department of Defense, 1998). Assim, a função desta ferramenta é determinar, por análise do modo de falha, o efeito de cada falha no funcionamento do sistema e identifica pontos únicos da falha que são críticos ao sucesso da missão ou à segurança. De forma semelhante, a ferramenta FMEA é uma técnica de fiabilidade que tem como objetivos (Fogliatto & Ribeiro, 2011):

- Identificar e avaliar as falhas potenciais que podem surgir num produto ou processo;
- Identificar ações que possam eliminar ou reduzir a chance de ocorrência dessas falhas;
- Documentar a análise efetuada por forma a criar um histórico para que possa auxiliar em revisões e desenvolvimentos futuros do projeto ou processo.

De facto, esta ferramenta pode também classificar cada falha de acordo com a criticidade, categoria de efeito de falha e probabilidade de ocorrência. Este procedimento

é o resultado de duas etapas: o modo de falha e análise de efeito (FMEA) e a análise de criticidade (CA). Aliás, de acordo com o Department of Defense (1998), a FMEA pode ser realizada sem uma CA. Contudo, uma CA precisa da FMEA para se realizar, uma vez que depende da identificação prévia dos modos de falha críticos para os itens na produção do sistema. Assim, quando ambas as etapas estão concluídas, o processo total chama-se análise dos modo, efeitos e Criticidade de falha (FMECA).

Embora existam múltiplos modos de falha, muitas vezes os efeitos da falha são os mesmos ou muito semelhantes na sua natureza. De facto, na perspetiva da função do sistema, o resultado de qualquer falha de um componente pode resultar na degradação da função do sistema. Além deste, sistemas e máquinas semelhantes terão frequentemente os mesmos modos de falha, mas a utilização do sistema irá determinar as consequências do fracasso. O anexo “A” ilustra um documento de trabalho da NASA para realizar a análise do modo e efeito de falha (National Aeronautics and Space Administration, 2008).

Por fim, a FMEA utiliza a lógica indutiva numa abordagem de "*bottomtoms up*" que compreende, como o próprio nome indica, uma análise que começa no nível mais baixo da hierarquia do sistema (por exemplo: parte do componente) e, através de um conhecimento dos modos de falha de cada parte, o analista determina o efeito que cada modo de falha terá sobre o desempenho do sistema (Department of Defense, 1998). Na verdade, o gráfico Causa-Consequência é baseado nesta metodologia e mostra as relações lógicas entre causas (eventos que são analisados sem mais detalhes) e consequências (eventos que são preocupantes apenas em si mesmos e não porque afetam outros eventos).

2.4.6.1 Número prioritário de Risco

A análise crítica de uma falha deve ser realizada de forma racional com recurso a métodos numéricos por forma a quantificar os riscos. Assim, o número de prioritário de risco (RPN) apresenta-se como uma abordagem alternativa de avaliação da análise de criticidade. Este é utilizado para ordenar as várias preocupações por risco apresentado ao sistema e a organização e, assim, fornece uma estimativa numérica qualitativa desse mesmo risco. Desta forma, analiticamente, o RPN é definido como o produto de três fatores avaliados independentemente que são: Severidade (S), Ocorrência (O) e Deteção (D). A forma analítica que expressa o RPN encontra-se explanada na equação 14 (Department of Defense, 1998).

$$RPN = (S) \times (O) \times (D) \quad (14)$$

A severidade (S) é uma avaliação da gravidade do efeito do modo de falha potencial para o próximo componente superior, subsistema, sistema ou para o cliente, caso ocorra. De facto, a gravidade do efeito de falha é tipicamente estimada numa escala de "1" a "10", onde o "10" representa um quadro perigoso na gravidade e "1" quando não existe perigo associado. A tabela 4 ilustra o quadro de severidade onde explica a escala em função do efeito e critério da falha.

Tabela 4 - Quadro com os critérios do fator de severidade – RPN (Fonte: Adaptado de NASA, 2008)

| Efeito | Critério: Severidade do efeito da falha | Escala |
|----------------------|--|---------------|
| Perigoso - sem aviso | Potencial problema de segurança, saúde ou meio ambiente. A falha ocorrerá sem aviso prévio. | 10 |
| Perigoso - com aviso | Potencial problema de segurança, saúde ou meio ambiente. A falha ocorrerá com aviso. | 9 |
| Muito alto | Elevada interrupção na função da instalação. Toda a Missão é perdida. Atraso significativo na restauração da função. | 8 |
| Alto | Elevada interrupção do funcionamento da instalação. Parte da missão é perdida. Atraso significativo na restauração da função. | 7 |
| Moderado alto | Interrupção moderada do funcionamento da instalação. Alguma parte da missão é perdida. Atraso moderado na restauração da função. | 6 |
| Moderado | Interrupção moderada do funcionamento da instalação. 100% da missão pode precisar ser retrabalhada ou o processo atrasado. | 5 |
| Moderado baixo | Interrupção moderada do funcionamento da instalação. Parte da missão pode precisar ser retrabalhada ou o processo atrasado. | 4 |
| Baixo | Pequena perturbação no funcionamento da instalação. A reparação em caso de falha pode ser mais longa do que a comunicação da avaria, mas não retarda a missão. | 3 |
| Muito baixo | Pequena interrupção no funcionamento das instalações. A ação de reparação da falha pode ser realizada durante a comunicação da avaria. | 2 |
| Nenhum | Não há razão para esperar que a falha tenha qualquer efeito sobre a segurança, saúde, meio ambiente ou missão. | 1 |

A ocorrência (O) é definida como a probabilidade de que uma causa/mecanismo específico ocorra (Department of Defense, 1998). Na verdade, esta probabilidade é um número de índice e não uma probabilidade e é considerada numa escala de 1 a 10. Neste contexto, a taxa de falha baseia-se no número de falhas que são previstas durante a vida útil do projeto do componente, subsistema ou sistema e o número de classificação de ocorrências que está relacionado à escala de classificação e não reflete a probabilidade real de ocorrência. A tabela 5 ilustra a relação entre os parâmetros acima mencionados de acordo com a escala referida.

Tabela 5 - Quadro com os critérios do fator de ocorrência – RPN (Fonte: Adaptado de Department of Defense, 1998)

| Probabilidade da Falha | Possível taxa de falha | Escala |
|--|----------------------------------|---------------|
| Muito alto: A falha é quase inevitável | ≥1 em 2 1 em 3 | 10 9 |
| Alto: Falhas repetidas | 1 em 8 1 em 20 | 8 7 |
| Moderado: Falhas ocasionais | 1 em 80 1 em 400 1 em 2000 | 6 5 4 |
| Baixo: relativamente poucas falhas | 1 em 15000 1 em 150000 | 3 2 |
| Remoto: Falha é improvável | ≤1 em 1500000 | 1 |

Por último, o fator de detecção (D) é tido como uma avaliação da capacidade para detetar uma potencial causa da falha ou a capacidade de detetar o seu modo de falha. Este fator, à semelhança dos demais apresentados, é enquadrado numa escala de "1" a "10". Assim, por forma a facilitar a visualizar e facilitar aplicação dos critérios, a tabela 6 demonstra um método de escalar a detecção da falha.

Tabela 6 - Quadro com os critérios do fator de detecção – RPN (Fonte: Adaptado Department of Defense, 1988)

| Deteção | Critério: Probabilidade de deteção | Escala |
|--------------------|--|---------------|
| Incerteza absoluta | A probabilidade de detetar a potencial causa da falha e o modo de falha é incerta ou não é possível de realizar. | 10 |
| Muito remoto | A probabilidade de detetar a potencial causa da falha e o modo de falha é muito remota. | 9 |
| Remoto | A probabilidade de detetar a potencial causa da falha e o modo de falha é remota. | 8 |
| Muito baixo | A probabilidade de detetar uma potencial causa de falha e o modo de falha é muito baixa. | 7 |
| Baixo | A probabilidade de detetar uma potencial causa de falha e o modo de falha é baixa. | 6 |
| Moderado | A probabilidade de detetar uma potencial causa de falha e o modo de falha é moderada. | 5 |
| Moderadamente alto | A probabilidade de detetar uma potencial causa de falha e o modo de falha é moderadamente alta. | 4 |
| Alta | A probabilidade de detetar uma potencial causa de falha e o modo de falha é alta. | 3 |
| Muito alto | A probabilidade de detetar uma potencial causa de falha e o modo de falha é muito alta. | 2 |
| Quase certo | A probabilidade de detetar uma potencial causa de falha e o modo de falha é quase certa | 1 |

Por fim, após os modos de falha serem ordenados por RPN, as ações corretivas devem ser realizadas e priorizadas para os itens críticos mais bem classificados. Na verdade, a intenção de qualquer ação de manutenção recomendada é reduzir uma ou todas as classificações de ocorrência, gravidade e/ou detecção e, conseqüentemente, o número prioritário de risco.

2.4.6.2 Relação entre o Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis e o Failure Report Analysis and Corrective Action System

Para o presente trabalho é importante relacionar a análise dos modos, efeitos e criticidade da falha com a ferramenta FRACAS abordada no subcapítulo 2.1. Na verdade, o FRACAS e o FMECA foram concebidos separadamente e podem ser utilizados de forma independente um do outro, contudo existe um efeito sinérgico quando os dois esforços são acoplados. Na verdade, o FMECA é uma identificação analítica dos modos de falhas e dos potenciais efeitos adversos destes sobre o sistema e a missão. Pelo contrário, o FRACA representa, na prática, uma experiência do “mundo real” de falhas reais e as suas conseqüências.

Por último, de forma conjugada, as ferramentas FMECA e FRACAS otimizam o processo de deteção de falhas e resolução das avarias. Efetivamente, uma FMECA beneficia o FRACAS ao providenciar uma abrangente fonte de efeito de falha e informação sobre a gravidade da falha para a avaliação de ocorrências reais de falhas. Desta forma, a experiência de falhas reais relatadas e analisadas no FRACAS fornece um meio de verificação de forma completa e exata do FMECA (Department of Defense, 1985). Assim, é vital existir uma concordância entre o “mundo real”, como relatadas e avaliadas no FRACAS, e o “mundo analítico”, como documentadas pela FMECA.

2.4.7 Árvore de falhas

A árvore de falhas (FTA - *Fault Tree Analysis*) é um método de análise por diagrama de blocos que permite determinar, de forma lógica, quais os modos/formas que produzem falhas críticas num determinado sistema. Na verdade, esta técnica é extremamente útil na análise de segurança e funciona muito bem conjugada com a ferramenta FMEA. Esta, deve-se ao facto de a FMEA ser considerada uma análise “de baixo para cima”, enquanto a FTA é considerada uma análise de “cima para baixo”. De facto, as FMEA’s e as FTA’s são métodos compatíveis de análise de risco, sendo que, a escolha do método depende da natureza do risco a ser avaliado (Department of Defense, 1998).

Os métodos de análise de árvore de falhas são particularmente úteis em caminhos funcionais de alta complexidade nos quais o resultado de uma ou mais combinações de eventos não críticos pode produzir num evento crítico indesejável. Contudo, a FTA apresenta uma probabilidade considerável de erro derivada da análise ser efetuada de cima para baixo, bem como, derivada do pressuposto de consideração de falhas múltiplas.

De forma geral, a FTA exige um elevado nível de habilidade e um tempo notável de engenharia, contudo, a qualidade dos resultados é consideravelmente elevada. Na verdade, os resultados em análise são úteis nas seguintes aplicações (Department of Defense, 1998):

- Atribuição de probabilidades ao modo de falha crítica entre os níveis mais baixos das avarias do sistema.
- Comparação de configurações de projeto alternativas do ponto de vista da segurança.
- Identificação de caminhos de falhas críticas e pontos fracos do projeto para ação corretiva.

- Avaliação de abordagens alternativas de ação corretiva.
- Desenvolvimento de procedimentos operacionais, de teste e de manutenção para reconhecer e acomodar modos de falha crítica inevitáveis.

A FTA é composta por um conjunto de símbolos, ilustrados na figura 23, que são comumente utilizados no diagrama e que apresentam um determinado significado na sua composição. Os símbolos são relacionados entre si através de uma relação de fiabilidade funcional, sucesso ou insucesso, e pode ser visualizado um exemplo deste diagrama a partir do anexo B, que exterioriza um exemplo de um diagrama de análise de árvore de falhas de um circuito de disparo simplificado de um motor de um canhão/rocket (National Aeronautics and Space Administration, 2008).











| | |
|---|---|
|  | Porta lógica "E" (Gate "AND") – O output só se verifica se um e outro input se verificarem |
|  | Porta lógica "OU" (Gate "OR") – O output verifica-se se um ou outro dos inputs se verificarem - também designado por "OU Inclusivo" |
|  | Porta lógica "k de n" ("Voting Gate") – O output verifica-se se pelo menos "k" dos "n" inputs se verificarem |
|  | Acontecimento "FALHA BÁSICA" ou "FALHA PRIMÁRIA" |
|  | Acontecimento "NÃO DESENVOLVIDO" - Considera-se não ser necessário desenvolver mais o acontecimento em termos de causas |
|  | Acontecimento "FALHA DE TOPO" ou DESCRIÇÃO INTERMÉDIA |
|  | Acontecimento "CASA" - Pode ocorrer ou não ocorrer com certeza (TRUE or FALSE) |
|  | Porta lógica "INIBIÇÃO" ("INHIBIT Gate") – O input produz o output quando o acontecimento condicional existir |
|  | Acontecimento "CONDICIONAL" usado com a porta Inibição |
|  | Transferência, Repetição ou Sub-Árvore correspondente ao respectivo ramo, assinalado no fluxograma lógico |

Figura 23 - Simbologia e nomenclatura da árvore de falhas (Fonte: Sobral, 2010)

Assim sendo, existe um conjunto de etapas que servem como orientação para a edificação de uma FTA e respetiva aplicação, que são (Department of Defense, 1998; Sobral, 2010):

- Etapa 1: Definir os acontecimentos de topo. Sendo que, o FTA é conhecido pela análise de cima para baixo, então torna-se crítico definir o topo;
- Etapa 2: Definir, identificar e estruturar as características do sistema, como por exemplo, os componentes, pontos críticos e níveis de risco. Assim que

o sistema estiver edificado permite-nos vislumbrar uma visão clara e objetiva;

- Etapa 3: Reconhecer as possíveis falhas. Ainda nesta etapa é importante identificar os modos, efeitos e causas das falhas. Desta forma, pode fazer-se recurso à ferramenta FMEA por forma a contemplar o FTA.
- Etapa 4: Construir a árvore de falhas. Nesta fase é importante usar portas lógicas e simbologia normalizadas, bem como, dependência de falhas, arranjos físicos ou redundâncias;
- Etapa 5: Desenvolver o modelo e calcular as probabilidades de falha. O cálculo é realizado através de métodos analíticos e serão efetuados em função dos dados disponíveis. Ainda nesta fase é necessário identificar os caminhos críticos;
- Etapa 6: Avaliar e analisar os resultados obtidos para os acontecimentos de topo;
- Etapa 7: Implementar e monitorizar as ações de manutenção para os bens críticos definidos

Por último, a FTA é composta de forma grosseira por duas grandes fases que são a análise qualitativa e a análise quantitativa. Assim, a análise qualitativa centra-se na quantidade de combinações existentes de acontecimentos que podem imputar falhas. Ao invés desta, a análise quantitativa baseia-se na determinação e quantificação da probabilidade de falha ou frequência com que esta ocorre no sistema (Sobral, 2010).

2.5 Bestsourcing

O *bestsourcing* é um termo logístico que associa a utilização em simultâneo de dois tipos de fontes logísticas que são o *insourcing* e o *outsourcing*. Assim, o conceito de *insourcing* está relacionado com o “*core competencies*”, que representa os pontos fortes e os conhecimentos que permitem que uma determinada organização possa ser mais competitiva. Estas competências apresentam-se como uma vantagem competitiva de uma organização, no médio e longo prazo, oriundo da aptidão de produzir o recurso necessário na qualidade requerida, a um custo normalmente mais baixo (Prahalad & Hamel, 1990).

Opostamente ao *insourcing*, o *outsourcing* é quando uma determinada organização faz recurso de bens ou serviços de uma outra organização, concorrente ou

não, permitindo otimizar tempos de ação, incrementar qualidade e diminuir custos de operação. Existe realmente uma redução de custos pois uma ação realizada pela organização pode custar mais recurso e tempo do que uma organização especializada. De forma convergente, Santos (1998) define o *outsourcing* como um processo através do qual uma dada organização (contratante), tendo em conta a sua estratégia, contrata outra (subcontratado) na perspetiva de estabelecer um relacionamento mutuamente benéfico para desempenho de uma ou várias atividades que a primeira não pode ou não lhe convém desempenhar e na execução das quais a segunda é tida como especialista.

Este tipo de relação, permite que a organização contratante obtenha um serviço mais especializado sem consumir os recursos humanos, materiais e outros da organização e, ainda, um serviço com uma qualidade superior uma vez que é a organização contratada é, normalmente, especializada na área contratada e uma melhor gestão do tempo que, inerentemente, se traduz em ganhos económicos.

A gestão da cadeia de valor deve estar de acordo com a visão da organização e a integração de organizações externas na política da gestão logística da empresa, que carece de uma análise cuidada do impacto das relações estabelecidas. Para tal, as atividades nucleares que fazem parte da cadeia de valor devem ser previamente identificadas e validado o impacto no desempenho das atividades e fatores críticos de sucesso (Canuto, 2009). Na verdade, as atividades centrais que permitem a organização ganhar vantagem competitiva devem ser realizadas de forma interna para manter o controlo nos elementos de sucesso organizacional.

Uma determinada organização irá envolver-se em transações a fim de obter lucro, contudo só serão bem-sucedidas se conseguirem criar uma base de competências e conhecimentos que lhes garanta uma posição sustentável dentro do ambiente em que estão inseridas, permitindo obter uma margem de lucro aceitável (Kirzner, 1973).

Neste tipo de utilização de recurso, *bestsourcing*, é importante definir claramente os limites de utilização de recursos a fontes externas ou fontes internas. Deste modo, devem ser avaliados a partir de, principalmente, dois parâmetros fundamentais que são o âmbito estratégico e o contributo específico da atividade na competitividade. Sobre os mencionados aspetos, Dunn (2015) criou uma matriz de decisão onde apresenta 4 quadrantes distintos onde explana a tomada de decisão mediante o nível da estratégia e competitividade. A figura 24 ilustra a supramencionada matriz de decisão onde explana uma matriz de dupla entrada e a decisão em função do ponto de vista estratégico e competitivo. Desta forma, em análise à figura anterior, é possível concluir o seguinte:

- quando as atividades a realizar apresentam elevada importância estratégica e mantêm a organização competitiva devem ser feitos com recursos a fontes da própria organização (Quadrante I);
- quando as atividades a realizar apresentam elevada importância estratégica, mas não mantêm a organização competitiva, devem ser feitas as alterações organizacionais necessárias para que permita que esta se torne competitiva (Quadrante II);
- quando as atividades a realizar não apresentam elevada importância estratégica e não mantêm a organização competitiva devem ser feitas com recursos a fontes externas à organização mantendo parcerias e colaborações lucrativas para a organização (Quadrante III);
- quando as atividades a realizar não apresentam elevada importância estratégica, mas mantêm a organização competitiva devem ser analisadas diversas variáveis como o custo, recursos utilizados, exposição estratégica, aspectos competitivos, competências internas e ambiente comercial atual (Quadrante IV);

| | | |
|------------------------|------------------------------------|------------------------|
| | Estratégico | Não estratégico |
| Competitivo | <i>Insourcing</i> ("Como está") | Carece de discussão |
| Não competitivo | Reengenharia | <i>Outsourcing</i> |

Figura 24 - Matriz de decisão de fonte de fornecimento (Fonte: adaptado de Dunn, 2015)

Ainda neste âmbito, Leite e Pereira (2003) faz menção a uma matriz de decisão na adjudicação de serviços de manutenção, bem como, refere que os recursos a *outsourcing* para os serviços de manutenção são úteis desde que consista na redução de custos sem aumentar os riscos inerentes a uma manutenção de qualidade deficiente ou incompleta. Assim, a tabela 7 descreve o processo de decisão na adjudicação de serviços

externos com base no critério de criticidade, competências/ conhecimento existente no ambiente interno e custo.

Tabela 7 - Processo de decisão na adjudicação de serviços (Fonte: Canuto, 2009)

| Equipamentos e ações de manutenção São críticos? | Competências existentes | Onde apresenta menor Custo? | Recurso a <i>outsourcing</i>? |
|---|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Sim | Interno | Interno | Não |
| | Externo | - | A avaliar |
| Não | Interno | Interno | Não |
| | Externo | Externo | Sim |
| | Interno e Externo | Interno | Não |
| | Interno e Externo | Externo | Sim |

Por fim, com base na tabela anterior, é importante entender que a não existência de competências internas para realizar ações críticas de manutenção tem de ser ponderada de forma individualizada pela gestão de topo da organização. A mão de obra, contratos, empreitadas e consórcios na manutenção devem ser analisados de acordo com a situação apresentada e devem ter em conta aspetos como a frequência, a especificidade, a dimensão, custo e capacidade técnica envolvidas nos trabalhos de manutenção.

2.6 Manutenção baseada na condição (CBM)

Com o arrançar dos anos 90 e o desenvolvimento exponencial de novas tecnologias foi possível começar a determinar a condição real do equipamento, ao invés de depender de estimativas de tempo de vida baseadas na idade e aparência do equipamento.

Assim, sendo essas tecnologias económicas e acessíveis e a não existência de um padrão nem uma correlação direta entre a idade e a falha, em grande parte dos equipamentos, permitiu que a metodologia de manutenção baseada na condição (CBM – *Condition based maintenance*), também conhecida como Inspeção e teste preditivo (PT&S - *Predictive Testing and Inspection*) ou manutenção preventiva (PM), adquirisse um elevado destaque no mundo da manutenção (Sapp, 2016).

O CBM pressupõe um registo de dados de condição de um equipamento que, quando colocados de forma gráfica, permite que sejam realizados controlos da condição, bem como comparar os níveis de alarme previamente definidos com base no fabricante, norma ou por histórico e verificar quando é necessário realizar intervenções. Deste modo, a figura 25 ilustra um gráfico de deteção de degradação, que mostra o estado inicial, a progressão temporal até ao início da degradação, o estado de alerta e, por fim, o estado urgente de alerta que indica uma intervenção imediata. Assim, o momento real da falha

para a maioria dos sistemas e componentes não é conhecido, contudo, é facto quando a falha é iminente (National Aeronautics and Space Administration, 2008).

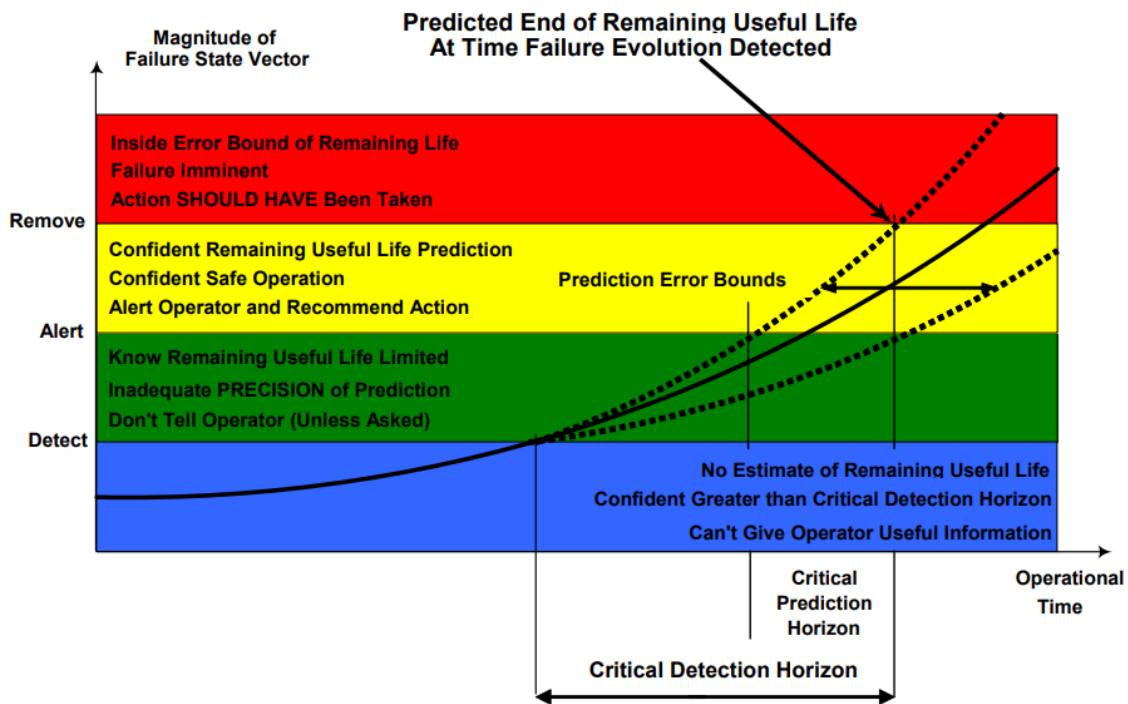


Figura 25 - Gráfico de detecção da degradação da análise de controlo de condição (Fonte: NASA, 2008)

Ainda relativamente à figura anterior é possível observar um progresso constante não linear da condição básica até à potencial falha e, também, é possível perceber a mudanças na inclinação da curva definida pelos dados retirados entre a falha potencial e a falha funcional. Deste modo, à medida que o ponto de falha é alcançado, a resistência do bem à falha diminui de forma exponencial e, desta forma, advém um aumento exponencia da curva. Na verdade, assim que as condições do sistema passam o limite de alerta de urgência, zona definida a vermelho, e se aproximam da falha funcional, a falha catastrófica ocorre, geralmente, sem aviso prévio.

Assim, é extremamente importante ter em atenção os níveis de alerta e, uma vez ultrapassado o limite de alerta, o intervalo de monitorização deve ser reduzido para entre um terço a um quarto do intervalo anterior. Na verdade, assumindo que dados coletados continuam a aumentar, o intervalo de monitorização deve continuar a ser reduzido ou, por outro lado, se as leituras retiradas estabilizarem, o intervalo de monitorização pode ser aumentado (Blanchard et al., 1995).

De facto, os dados da linha de base são os dados obtidos pelos testes realizados através dos métodos de controlo de condição e representam o equipamento em condições operacionais. Estes têm a seguinte utilidade (National Aeronautics and Space Administration, 2008):

- São usados como comparação para medições futuras em unidades semelhantes.
- São a base da análise de tendências para prever a condição do equipamento.

O aumento tecnológico existente no final do século XX e início do século XXI veio potenciar os métodos de controlo de condição existentes. Assim, atualmente, existem vários métodos que são utilizados para avaliar a condição dos sistemas e equipamentos que permitem determinar o momento mais eficaz para programar e realizar a manutenção. Assim, as abordagens de PT&I incluem (Blanchard et al., 1995):

- Análise de vibração;
- Termografia infravermelha;
- Detecção de ruído ultrassónico;
- Análise de partículas de lubrificante e desgaste;
- Monitorização da condição elétrica;
- Testes não destrutivos.

Deste modo, a tabela 8 permite relacionar as tecnologias de controlo de condição com várias instalações e componentes. Há diversos equipamentos onde é possível utilizar vários métodos de PT&I, contudo é imperativo que seja feito uma análise dos componentes críticos da instalação e os métodos economicamente mais viáveis na utilização da deteção das falhas. Aliás, a NASA (2008), criou um guia de utilização que permite correlacionar os métodos utilizados e adequados as necessidades iminentes.

Tabela 8 - Aplicação PT&I (Fonte: Adaptado de NASA, 2008)

| TECNOLOGIAS | Bomba | Motores elétricos | Geradores a diesel | Condensadores | Equipamentos pesados/Gruas | Disjuntores | Válvulas | Permutador de calor | Sistemas elétricos | Transformadores | Tanques, tubulações |
|--|-------|-------------------|--------------------|---------------|----------------------------|-------------|----------|---------------------|--------------------|-----------------|---------------------|
| Análise de vibrações | x | x | x | | x | | | | | | |
| Análise de lubrificante (Óleos) | x | x | x | | x | | | | | x | |
| Análise de partículas de desgaste | x | x | x | | x | | | | | | |
| Análise de rolamentos | x | x | x | | x | | | | | | |
| Monitorização de desempenho | x | x | x | x | | | | x | | x | |
| Deteção de ruídos | x | x | x | x | | | x | x | x | x | |
| Fluxo ultrassônico | x | x | | x | | | x | x | | | |
| Termografia infravermelha | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | |
| Testes não destrutivos (Espessura) | | | | x | | | | x | | | x |
| Inspeção Visual | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Resistência do isolamento | | x | x | | | x | | | x | x | |
| Análise da assinatura da corrente do motor | | x | | | | | | | | | |
| Análise do circuito do motor | | x | | | | x | | | x | | |
| Índice da polarização | | x | x | | | | | | x | | |
| Monitorização elétrica | | | | | | | | | x | x | |

Por último, com a correta implementação da política de manutenção com base no controlo de condição é desejável que as condições de funcionamento transitarem entre o nível ótimo de funcionamento e o nível mínimo admissível/aceitável, que coincide com os níveis de alerta anteriormente mencionados. Na verdade, a figura 26 ilustra esquematicamente a flutuação da condição de funcionamento pelos níveis supramencionados (Monchy, 2003).

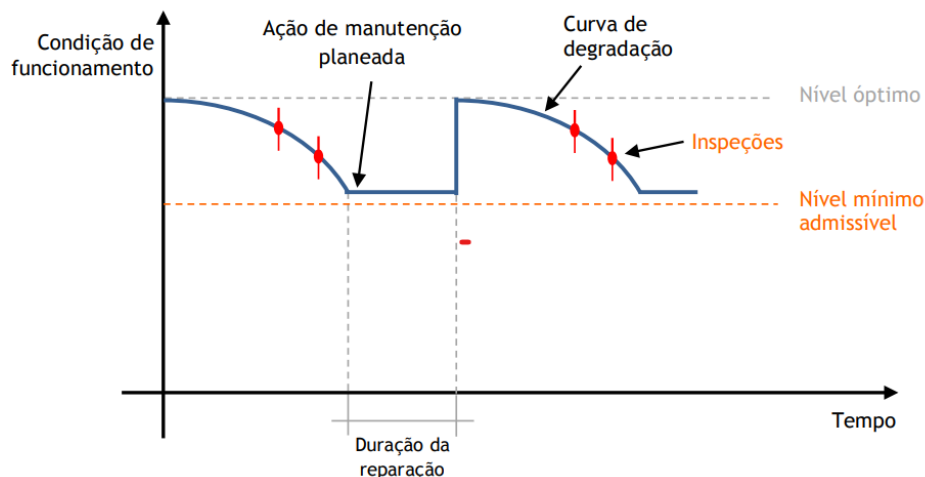


Figura 26 - Flutuação da condição de funcionamento de um equipamento em CBM (Fonte: Monchy, 2003)

3 Proposta de melhoria do modelo FRACAS

3.1 Contexto

O principal objetivo neste capítulo é desenvolver uma abordagem estruturada na avaliação e gestão da fiabilidade em manutenção. Neste sentido, é importante analisar as limitações apresentadas no subcapítulo 2.1.9 e desenvolver linhas de ação que permitam que o modelo desenvolvido incremente um maior nível de fiabilidade e eficiência e, em simultâneo, possibilite, de uma forma sistematizada, realizar um modelo centrado na fiabilidade. Deste modo, as principais limitações da metodologia FRACAS, apresentadas no subcapítulo 2.1.9, são as seguintes:

- Interação de organização complexa;
- Identificação das falhas e rastreio de dados ineficientes e ineficazes;
- Ausência de objetivos prioritizados;
- Problemas logísticos;

Ainda, é importante analisar a maturidade de uma dada organização, a política de manutenção e possibilidades económicas, para entender de que forma é possível integrar as mudanças propostas ao longo do presente capítulo. Também, parte-se do pressuposto que o modelo terá de se ajustar a qualquer organização, independentemente do conhecimento técnico ou capacidade económica, e será de carácter multidisciplinar. Isto é, o modelo proposto abraçará fundamentalmente as competências técnicas de manutenção, contudo, para responder às necessidades organizacionais existentes, terá de integrar competências de gestão económicas e logísticas.

Por último, a abordagem vai ser realizada de forma setorial ao longo do capítulo, culminando na integração das tecnologias apresentadas. Será também esquematizado o modelo proposto e em que etapa estarão aplicadas as ferramentas, assim como, a atribuição de responsabilidade e dependências.

3.2 Interação organizacional eficiente

A metodologia FRACAS, como referi anteriormente, está limitada, através da forma como a informação circula até aos órgãos de decisão, uma vez que, quanto maior uma organização é, mais complexa se torna a forma de interligação entre elementos/departamentos/unidades/órgãos. Na verdade, quanto maior a organização, mais complexos são os procedimentos e maior é a incerteza na forma como são realizados e se correlacionam. De facto, a demora na identificação da falha e o tempo que demora a realização das linhas de ação da manutenção são fatores que influenciam, de maneira determinante, a falta de eficiência da metodologia. Assim, para ultrapassar estas limitações, o modelo utilizado irá recorrer às seguintes ferramentas fundamentais, que são:

- Mapeamento de processos (MP);
- Procedimentos operacionais padrão (SOP - *Standard Operating Procedures*);
- *Computerized Maintenance Management System* (CMMS).

O mapeamento de processo é uma ferramenta essencial na gestão de um processo, que permite visualizar de forma clara o fluxo do mesmo e de que maneira os elementos se relacionam ao longo de cada etapa. Na verdade, no processo FRACAS, o mapeamento do processo deve ser realizado de forma micro (microprocessos), isto é, em etapas isoladas, bem como, de forma macro (macroprocessos), isto é, a um conjunto de etapas.

Esta ferramenta permite clarificar de que forma o processo se desenrola, permitindo que pessoas sem experiência no processo possam realizá-lo sem ter experiência, diminuindo erros e aumentando a sua eficácia. Assim, a figura 27 ilustra a aplicação do MP de identificação da falha. Esta ação permite definir claramente o microprocesso de um processo ou ação.

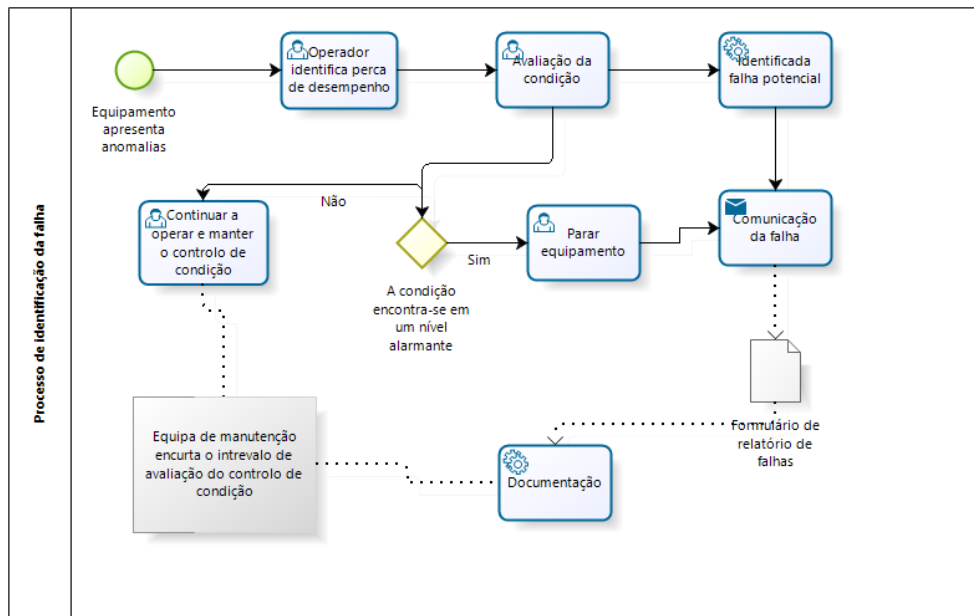


Figura 27 - Mapeamento da identificação da falha do FRACAS

Os processos devem ser ajustados consoante o nível de departamentos ou elementos existentes que estão diretamente envolvidos. De facto, a gestão dos processos é um fator chave para a eficiência dos mesmos e serve como base para analisar este indicador na metodologia FRACAS.

A realização de procedimentos operacionais padrão (SOP) é uma ferramenta bastante importante que permite definir de que forma é que devem ser realizados os procedimentos, por quem, como, quando, com que periodicidade e outros detalhes importantes. Na verdade, estes documentos permitem aumentar a probabilidade de sucesso nos trabalhos, manter a qualidade dos procedimentos, diminuir os erros e dúvidas existentes nos processos e, em simultâneo, colmatar algum desconhecimento e falta de experiência dos elementos que operam.

Na prática, uma SOP fornece instruções detalhadas de todos os passos para realizar uma determinada atividade, bem como, função/pessoa responsável pela ação, imagens esclarecedoras ou requisitos para os procedimentos. Assim, de uma forma geral, são compostas da seguinte forma (conforme anexo C):

- **Resumo:** O resumo permite que o utilizador consiga perceber de forma resumida qual é o procedimento que aborda o documento SOP;
- **Finalidade:** Nesta seção é descrita de forma simples, precisa e concisa o motivo/razão pelo qual o documento foi criado. Ainda, nesta caricatura é importante que seja mencionada a natureza do procedimento e razão pela qual a organização realiza o procedimento;

- **Âmbito:** À semelhança da secção anterior, o âmbito, deve ser redigido num paragrafo curto e deve conter nele as atividades que estão integradas no procedimento;
- **Definições:** De uma forma geral, esta secção serve para definir todos os termos do procedimento que precisam de um especial esclarecimento. Na prática, esta secção depende do departamento/setor e pode ser omitida se não for relevante ou necessária;
- **Procedimentos:** Esta é a secção onde o procedimento vem discriminado e, assim, fornece ao utilizador do documento instruções passo a passo de como realizar a atividade/processo/serviço. Nesta fase, é importante que as instruções sejam claras e escritas em frases curtas para que sejam facilmente interpretadas, podendo fazer-se acompanhar de imagens e nome/função dos responsáveis das ações.

Por último, o *software* de gestão de manutenção, ou *Computerized Maintenance Management System* (CMMS), é uma ferramenta extremamente útil na gestão da manutenção como mencionado no subcapítulo 2.2.6. Esta ferramenta tem uma amplitude enorme de benefícios onde, notoriamente, uma das suas maiores vantagens desta é o incremento na facilidade e velocidade da comunicação. Na verdade, esta ferramenta permite que a informação circule de uma forma instantânea e disponibiliza-a para todos os intervenientes da ação envolvidos.

Assim, a implementação desta ferramenta irá, através dos benefícios supramencionados, diminuir os tempos de espera e reparação pois, nestes períodos contempla tempos dedicados à transição da informação pelos elementos envolvidos e órgão de decisão. Deste modo, a sua implementação permite aumentar a eficiência e eficácia do processo.

A CMMS tem um considerável custo económico de implementação e um nível de complexidade maior, quando comparados com as demais ferramentas mencionadas. Contudo, a sua implementação assume uma enorme vantagem para a aplicação do modelo apresentado, como já explanado, e permite colmatar os problemas originados pela complexidade organizacional existente.

Desta forma, a tabela 9 permite correlacionar as 3 ferramentas descritas neste subcapítulo com fatores de implementação organizacionais.

Tabela 9 - Comparação de características de implementação das ferramentas apresentadas (MP, SOP e CMMS)

| FATORES DE IMPLEMENTAÇÃO | FERRAMENTAS DO PROCESSO | MP | SOP | CMMS |
|--|-------------------------|---------|---------|---------------|
| Custo de implementação | | Baixo | Baixo | Médio - Alto |
| Complexidade da implementação | | Baixo | Baixo | Médio |
| Complexidade de utilização | | Baixa | Baixa | Média |
| Aceitação cultural/organizacional | | Elevada | Elevada | Alta |
| Necessidade de maturidade organizacional | | Baixa | Baixa | Média |
| Capacidade de disseminar informação | | Boa | Boa | Elevada |
| Aumento de eficiência procedimental | | Elevada | Elevada | Muito elevada |

3.3 Identificação das falhas e rastreio dos dados

A fase de identificação das falhas é de considerável criticidade e, a maior limitação apresentada pela metodologia FRACAS, é precisamente a falta de eficiência na identificação das falhas e monitorização dos dados. Para isso, é importante analisar qual a fase do processo FRACAS é que se dá a identificação, análise, verificação e monitorização das falhas. Assim, a figura 28, ilustra o processo FRACAS e demonstra, perfeitamente definido, onde decorre a fase supramencionada, descrita como fase I.

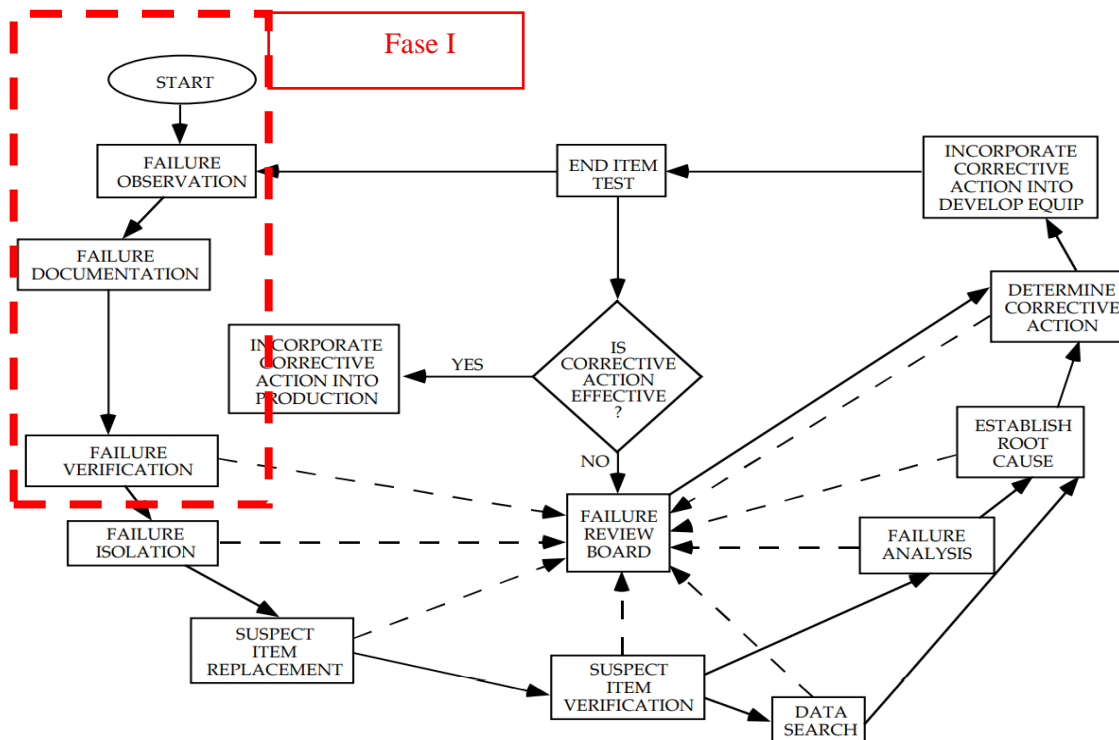


Figura 28 - Fase I do FRACAS convencional (Fonte: Adaptado de MIL-HDBK-338B, 1988)

Deste modo, tecnologia de manutenção baseada na condição (CBM) deve ser inserida nesta fase, para possibilitar a identificação da falha através de um método concreto, padrão e claramente definido. Na verdade, o controlo de condição, através das técnicas mencionadas no subcapítulo 2.6, deve ser realizado para identificar e monitorizar a falha, sendo esta, a informação essencial e crítica para todo o planeamento da ação. Esta ferramenta permite obter a antecipação necessária para tornar o processo mais eficiente e eficaz:

- Eficiente, pois permite a deteção e acompanhamento da evolução da condição da falha de maneira a ser intervencionado no momento ótimo, isto é, o momento mais oportuno para a intervenção, conjugando o tempo de fornecimento de eventuais bens necessários às ações de manutenção e o tempo de paragem do equipamento, no menor período possível e com menor impacto à organização;
- Eficaz, pois possibilita que seja analisada a condição do equipamento através dos sintomas ilustrados nessa análise. Por sua vez, permite prever, através das técnicas de análise de condição, possíveis causas para os sintomas apresentados e direcionar o sintoma de forma concreta e precisa.

A implementação deste tipo de manutenção, CBM, tem um valor acrescentado para a organização e um barreira cultural para quebrar pois, quando uma organização apresenta uma fraca política de manutenção, torna-se mais complexa à aceitação destes métodos. Na vertente económica, é necessário que a gestão de topo esteja alinhada com o departamento de manutenção na necessidade de implementação deste tipo de técnicas pois, com a visão organizacional correta, é possível concluir que com este método o controlo das variáveis é superior e permite diminuir avarias imprevisíveis.

Assim, a tabela 10 explana a correlação da ferramenta CBM com os fatores de implementação organizacionais.

Tabela 10 - Características na implementação do CBM

| FATORES DE IMPLEMENTAÇÃO | FERRAMENTA CBM |
|---|-------------------|
| Custo de implementação | Alto |
| Complexidade da implementação | Alto |
| Complexidade de utilização | Alto |
| Aceitação cultural/organizacional | Médio – Baixo |
| Necessidade de maturidade organizacional | Alta – Elevada |
| Aumento de eficiência na identificação de falha | Alto |
| Aumento de eficiência na monitorização da falha | Elevada |

O controlo de condição deve ser feito ao longo da vida do equipamento, assim como, as manutenções planeadas sistemáticas, conforme a matriz apresentada na figura 21. Desta forma, assim que é detetada uma anomalia, seja ela por falta de desempenho do equipamento ou outro sintoma aparente, devem ser realizadas as análises de condição, no menor tempo possível, para manter a evolução da avaria monitorizada. Assim que é identificada e confirmada a anomalia deve ser reportada, documentada e verificada. Toda a informação deve transitar o mais rapidamente possível para que os órgãos de decisão técnica (ODT), neste caso um departamento/secção ou grupo de manutenção, tome ação. Este tipo de monitorização deve ser encarado como um ciclo de constante análise para que os valores sejam registados e documentados, e haja um acompanhamento de condição

onde é possível prever a degradação do equipamento e planear, com todos os departamentos envolvidos, as ações a realizar.

Sendo assim, a figura 29 descreve esquematicamente o ciclo supramencionado no procedimento de controlo de condição dos equipamentos.

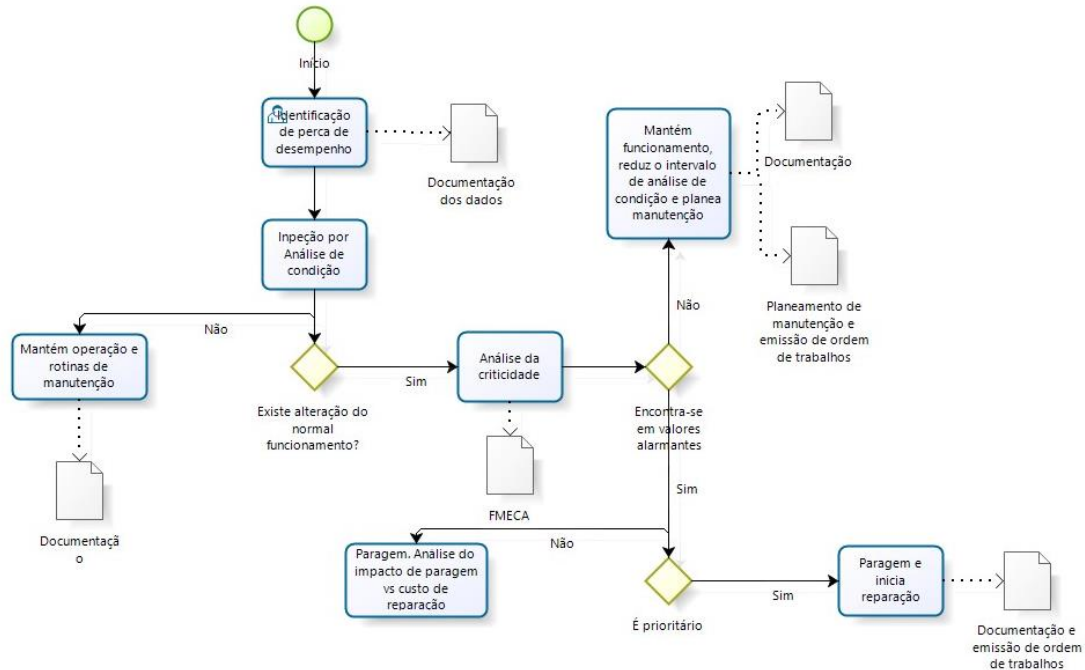


Figura 29 - Esquematização do CBM dos equipamentos do FRACAS

Conforme já mencionado, se não existir um *software* que permita que a informação seja disponibilizada na hora para todos os envolvidos na ação, deve fazer-se recurso das ferramentas de mapeamento de processos, como sugerido no subcapítulo anterior (3.2), por forma a informação transitar o mais rapidamente possível até aos órgãos de decisão técnica.

Por último, recorrendo aos pilares da filosofia de manutenção RCM, mais concretamente ao mapeamento da política de manutenção explicado na figura 21, é importante perceber que a primeira linha de ação é o recurso à ferramenta CBM, contudo devem ser realizadas os outros tipos de manutenção. De facto, o planeamento sistemático de manutenções definidas pelo fabricante deve ser feito com a periodicidade definida ou replaneada conforme a conjuntura operacional, logística e organizacional. Consequentemente, as manutenções corretivas devem ser realizadas nas situações onde se apresentam condições economicamente mais viáveis, sendo que, devem-se apresentar em número reduzido.

3.4 Órgão de direção técnica

A priorização dos objetivos, controlo logístico, análise de existências, planeamento, direção, monitorização deve ir de acordo com a visão estratégica organizacional e realizada por uma entidade competente que irá gerir o processo do FRACAS. No FRACAS convencional, a gestão do processo de manutenção é realizada a partir do conselho de revisão de falhas (FBR), descrita no subcapítulo 2.1.7, que tem como missão principal supervisionar o funcionamento do sistema FRACA.

Para aumentar a eficiência organizacional é importante analisar qual a autoridade do FBR e quais são as ações que dependem deste. Assim, é importante robustecer um grupo de decisão, conferindo-lhe maior autoridade e intervenção no processo, dotado das tecnologias e modelos de decisão para aumentar a eficiência e eficácia. Para tal, o modelo apresentado integra um elemento de decisão denominado de órgão de decisão técnica (ODT) com a competência de garantir o funcionamento eficiente e eficaz do sistema FRACA. A figura 30, representa um sistema FRACA onde integra o ODT e a fase do processo onde são realizadas as ações de priorização de objetivos e análise da flexibilidade logística (Fase II).

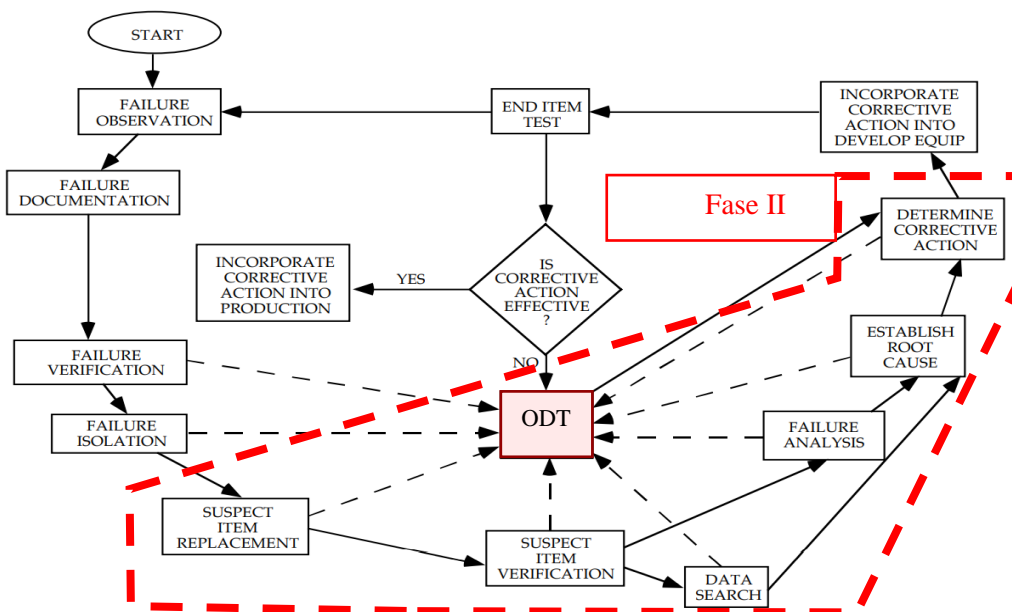


Figura 30 - Fase II e ODT do FRACAS (Fonte: Adaptado de MIL-HDBK-338B, 1988)

À semelhança do FRACAS convencional, o ODT tem de ser composto por elementos qualificados e credíveis que assume as responsabilidades, deveres, direitos e autoridade que o FBR detém. A este órgão é lhe incrementada a responsabilidade da

gestão logística e de gestão de recursos humanos, pois são fatores essenciais para garantir uma flexibilidade logística e operacional, respetivamente, que irá permitir uma maior amplitude de ação e maior controlo sobre o processo operacional.

Na prática, ao ODT corresponde uma necessidade eminente de interligar o mundo técnico com a visão organizacional pois, para o técnico especializado na manutenção, os pilares de gestão não são tidos em conta no processo operacional e, para os gestores organizacionais, as ações da manutenção são irrelevantes na gestão económica da organização. Assim, ao ODT compete balancear os universos multidisciplinares envolvidos na gestão da manutenção, com a finalidade de beneficiar a organização mediante todas as envolventes existentes na manutenção, tais como o stock existente, recurso financeiros, recursos humanos, conhecimentos técnicos, importância estratégica do equipamento.

Deste modo, a dimensão do ODT deve oscilar conforme a dimensão da organização e a capacidade de investimento da mesma, podendo ir desde um departamento de manutenção, com a devida autoridade e conhecimento técnico, financeiro e económico, até a um grupo multidisciplinar. Contudo, de uma forma geral, este organismo (ODT) deve ter, fundamentalmente, 3 grandes núcleos de ação que são o núcleo de coordenação e planeamento, o núcleo de pessoal e logística e o núcleo técnico, sendo que, se a dimensão for reduzida existe acumulação de competências. Assim, a figura 31 ilustra esquematicamente a composição de um órgão de decisão técnica (ODT) do FRACAS proposto.

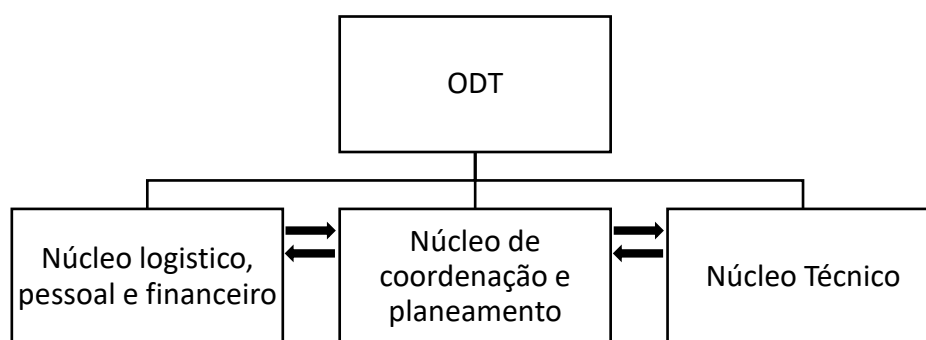


Figura 31 - Composição do ODT

Assim, o núcleo logístico, pessoal e financeiro tem a missão de gerir e coordenar o pessoal e a logística do processo FRACAS e autorizar o financiamento adequado para assegurar a implementação de ações de manutenção. Na prática, tem a principal função

de garantir os meios para a manutenção, os sobresselentes, bens ou serviços necessários, formação crítica (de acordo com AFNOR) as ações essenciais da organização e gestão dos recursos humanos envolvidos no processo.

O núcleo técnico assume, de forma integral, toda a análise técnica do processo FRACAS, onde se destacam as seguintes ações:

- Estabelecer prioridades operacionais;
- Rever os dados de falhas funcionais/desempenho de inspeções e testes adequados, fiabilidade e falhas nos testes de aceitação;
- Acompanhar e monitorizar a falha;
- Gerir, coordenar e validar as ações corretivas;
- Divulgar o estado de implementação e eficácia da ação corretiva;
- Documentação da falhas e ações corretivas.

O núcleo de coordenação e planeamento tem a competência da gestão do processo num todo, gestão da informação dos restantes departamentos (produção, financeiros ou CEO), definição de períodos de execução de ações de manutenção (período ótimo) e atribuição de responsabilidades específicas. Este núcleo tem a função de se ligar e coordenar com o departamento de produção o momento mais oportuno para parar o equipamento, através das análises dos demais núcleos que constituem o órgão de decisão. É ainda da competência deste núcleo, realizar a ligação a gestão de topo ou CEO por forma a transmitir relatórios de manutenção ou informação relevante, periodicamente, para a organização.

Na prática, o ODT tem a competência de gestão interdisciplinar do processo na vertente logística, financeira e operacional. Ainda, é da competência do ODT gerir, coordenar e executar tarefas de manutenção de acordo com os recursos existentes (financeiros, materiais ou pessoais) na organização. Também, deve estar munido de autoridade para definir prioridades de acordo com os objetivos estratégicos da organização, bem como, autoridade financeira para adquirir bens e serviços essenciais a manutenção dos equipamentos.

Por último, na fase 2, representada na figura 28, existem duas barreiras que impedem que o processo FRACAS seja eficiente que são a priorização de objetivos e a flexibilidade logística. Sendo assim, ambos os objetivos serão descritos, respetivamente, nos subcapítulos 3.4.1 e 3.4.2.

3.4.1 Priorização dos objetivos

A priorização de objetivos é essencial para uma organização sobreviver. De igual modo, no processo FRACAS, é extremamente importante definir objetivos operacionais. Esta necessidade prende-se ao facto de canalizar os recursos existentes de forma a permitir alcançar a visão estratégica definida pela organização. Na verdade, quando os recursos organizacionais são reduzidos e existe um elevado número de equipamentos e outras demandas, devemos apoiar a nossa decisão de priorizar as ações no compromisso entre a importância estratégica que o equipamento apresenta para a organização e a urgência de reparação (amplitude do dano, segurança, entre outras).

Assim, assumindo o pressuposto que as variáveis como a baixa disponibilidade dos recursos humanos, formação/nível de conhecimento na organização, stock, impacto económico, entre outros fatores, são contantes podemos criar uma dependência entre as variáveis de importância estratégica e urgência de reparação. Assim, se:

- o equipamento se apresenta como importante na estratégia organizacional e tem uma necessidade urgente de reparação, este deve ser intervencionado de imediato;
- o equipamento não apresentar importância estratégica, mas tem uma elevada urgência de reparação, então deve ser avaliada o recurso ao outsourcing.
- o equipamento encontra-se posicionado de forma importante na posição estratégica, mas a urgência de manutenção é baixa, então as ações de manutenção devem ser planeadas, a curto prazo (tendo em conta a análise de condição), para um período onde exista disponibilidade de recursos (financeiros, materiais e humanos).
- o equipamento não apresentar valor estratégico nem uma urgente manutenção, então mantém-se a vigilância sem ações de manutenção planeadas.

Deste modo, por forma a esquematizar as linhas de ação supramencionadas, a figura 32, ilustra um gráfico que relaciona as ações a realizar mediante a relação entre os fatores de importância estratégica e urgência.



Figura 32 - Modelo de decisão das prioridades na manutenção (2 fatores)

Na prática, a figura 32 define as prioridades de manutenção quando o impacto económico para as tarefas de manutenção assume valores constantes. Quando existe uma variação deste fator deve ser ponderado a prioridade da manutenção através de uma matriz de decisão de múltiplos fatores. Sendo assim, os fatores que devem ser ponderados são os seguintes:

- importância estratégica – a importância que um determinado equipamento apresenta para a sobrevivência organizacional ou dependência deste para realizar ações crítica a esta;
- urgência – necessidade de realizar a manutenção de acordo com o nível de condição de um dado equipamento;
- impacto económico – o impacto económico envolve os recursos financeiros disponíveis para realizar as manutenções.

Os fatores mencionados devem possuir pesos diferentes e devem variar de organização para organização. Assim, quando os gerentes de uma organização atribuem prevalência de fatores influenciaram diretamente nas prioridades definidas.

De forma convergente, o modelo criado deve-se adapte as necessidades e realidade organizacionais de cada organização. Esta flexibilidade do modelo permite que uma dada organização, com mais ou menos maturidade, determine a importância que

pretende atribuir aos diferentes fatores e, também, interligar o juízo técnico ao juízo financeiro. Na prática, este modelo tem o objetivo de permitir que a gestão de todo se alie aos elementos técnicos para influenciar na atribuição da prioridade que melhor se ajuste a organização.

Assim, surge a necessidade de criar um valor que permite determinar qual é o equipamento prioritário, que denomino como número prioritário estratégico (NPE). O NPE apresenta-se como uma abordagem numérica que permite avaliar a prioridade de reparação de um dado equipamento, dando prevalência ou não sobre o universo de equipamentos que existem em “chão de fábrica”. O cálculo do valor NPE depende da soma dos fatores supramencionados, ao qual acresce a multiplicação de um coeficiente que irá determinar o peso que a organização pretende atribuir ao fator que lhe compete. Assim, o NPE adotara o aspeto analítica expresso na equação 15.

$$NPE = Coef.\times A + Coef.\times B + Coef.\times C \quad (15)$$

Em que, A é o valor atribuído a importância estratégica, B é o valor atribuído a urgência e C é o impacto económico envolvido na manutenção.

Os coeficientes terão uma atribuição de 1 a 3 sendo que, naturalmente, o 3 apresenta maior peso e 1 com menor peso e, semelhantemente, os fatores de priorização serão escalados de 1 a 5. A responsabilidade em atribuir o valor aos coeficientes deve competir ao ODT que detém autoridade financeira, operacional e técnica sobre os equipamentos e, devido a estreita relação com a chefia e gestores, têm o conhecimento intersectorial para identificar o que tem prevalência na organização. A atribuição dos fatores (importância estratégica, urgência, impacto económico) deve ser realizada maioritariamente pelo núcleo técnico. Esta ação de cariz técnico, independentemente da visão de topo, deve ser realizada individualmente para cada equipamento.

A valorização e edificação da escala dos coeficientes e fatores é uma ação complexa que depende do elemento humano. Assim, por forma a facilitar a atribuição dos valores, ilustro as tabelas 11, 12, 13 e 14, que discriminam detalhadamente cada um dos valores imputados na matriz de decisão.

Tabela 11 - Coeficiente dos fatores de ponderação

| Coeficientes | |
|---------------------|--|
| Escala | Descrição |
| 3 | A gestão de topo atribui o fator como determinantes/indispensável para a organização. Vital para a sobrevivência organizacional. |
| 2 | A gestão de topo atribui o fator como muito importante para a organização. É reconhecido a sua importância. |
| 1 | A gestão de topo atribui o fator como não crítico/ não essencial. Não é reconhecido importância para a organização. |

Tabela 12 - Importância estratégica

| Importância estratégica | |
|--------------------------------|---|
| Escala | Descrição |
| 5 | O equipamento é vital para a sobrevivência organizacional. É extremamente importante para a produção e criação de valor da organização. |
| 4 | O equipamento é muito importante para a sobrevivência organizacional. É muito importante para a produção e criação de valor da organização. |
| 3 | O equipamento é importante para a sobrevivência organizacional. É importante para a produção e criação de valor da organização. |
| 2 | O equipamento é pouco importante para a sobrevivência organizacional. É pouco importante para a produção e criação de valor da organização. |
| 1 | O equipamento é não é importante para a sobrevivência organizacional. Não é importante para a produção e criação de valor da organização. |

Tabela 13 - Urgência de reparação ou Criticidade

| Urgência/RPN | |
|---------------------|---|
| Escala | Descrição |
| 5 | Criticidade elevada. Valores de $RPN > 500$ (Classificação A) ou os sintomas da falha encontram-se em nível de urgência/Crítico (CBM). |
| 4 | Criticidade alta. Valores de $100 < RPN \leq 500$ (Classificação B) ou os sintomas da falha encontram-se em nível alarmante-crítico (CBM) |
| 3 | Criticidade média. Valores de $50 < RPN \leq 100$ (Classificação C) ou os sintomas da falha encontram-se em nível alarmante (CBM) |
| 2 | Criticidade baixa. Valores de $10 < RPN \leq 50$ (Classificação D) ou os sintomas da falha encontram-se perto dos níveis alarmantes (CBM) |
| 1 | Criticidade muito baixa. Valores de $RPN \leq 10$ (Classificação E) ou os sintomas da falha encontram-se níveis normais, contudo houve ligeira perda de performance – nível de deteção (CBM). |

Tabela 14 - Impacto económico

| Impacto económico | |
|-------------------|---|
| Escala | Descrição |
| 5 | As ações de manutenção têm muito baixo impacto económico. Custos associados (material, humanos e outros financeiros envolvidos na reparação) são residuais. |
| 4 | As ações de manutenção têm baixo impacto económico. Custos associados (material, humanos e outros envolvidos na reparação) são baixos. |
| 3 | As ações de manutenção têm um impacto económico considerável. Custos associados (material, humanos e outros envolvidos na reparação) são considerados consideráveis |
| 2 | As ações de manutenção têm muito impacto económico. Custos associados (material, humanos e outros envolvidos na reparação) são elevados tendo em conta a verba da organização ou verba disponível para o processo de manutenção |
| 1 | As ações de manutenção têm um extremo impacto económico. Custos associados (material, humanos e outros envolvidos na reparação) terão um impacto elevado na organização. |

O Número prioritário de risco (RPN) deve ser avaliado conforme descrito no subcapítulo 3.4.2. Na prática o RPN traduz a criticidade da falha e, por sua vez, a urgência na reparação. Assim, a tabela 15 ilustra a relação entre o nível de classificação da criticidade de acordo com o risco apresentado pelo RPN (Ford Motor Company, 1995).

Tabela 15 - Classificação da criticidade (Fonte: Adaptado de Ford Motor Company, 1995)

| Classificação | Criticidade | Faixa de risco |
|---------------|-------------|----------------------|
| A | Elevada | $RPN > 500$ |
| B | Alta | $100 < RPN \leq 500$ |
| C | Média | $50 < RPN \leq 100$ |
| D | Baixa | $10 < RPN \leq 50$ |
| E | Muito Baixa | $RPN \leq 10$ |

Sendo assim, a título de exemplo, demonstro a figura 33 que exterioriza uma análise FMECA realizada pelo autor Jesus (2021), onde integra o cálculo do valor RPN e atribui a criticidade da falha. No entanto, como já descrito no subcapítulo 3.4.2, a FMECA deve ser complementada com a árvore de falhas, pois aumenta a fiabilidade da análise e melhora exponencialmente os resultados obtidos.

| Zona de Função | Função do subsistema | MDF | Causa do MDF | Efeito do MDF | Consequência do MDF | O | D | S | RPN | CRI |
|----------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---|---|---------------------|----|---|---|-----|-----|
| I | Alimentação dos cigarros | <i>Cig. Hopper min.</i> | Falha na alimentação do funil | Formas não são alimentadas. | Máquina pára. | 7 | 1 | 1 | 7 | E |
| I | Alimentação dos cigarros | <i>Cig. Vanes empty</i> | Falta de cigarros nas Vanes | Formas não são alimentadas. | Máquina pára. | 9 | 1 | 1 | 9 | E |
| I | Alimentação dos cigarros | <i>Loose end</i> | Pontas dos cigarros com falta de tabaco | Produto fora da especificação | Máquina pára. | 9 | 1 | 2 | 18 | D |
| I | Alimentação dos cigarros | <i>Missing filter</i> | Ausência de filtro | Encalhamento nos empurradores. | Máquina pára. | 9 | 1 | 4 | 36 | D |
| I | Alimentação dos cigarros | <i>Turret cover</i> | Abertura da tampa das formas | Encalhamento nas formas | Máquina pára. | 7 | 1 | 4 | 28 | D |
| V | Formação, dobragem e colagem do maço | <i>Blank missing in turret</i> | Rótulos danificados na torre | Ausência de rótulos na torre | Máquina pára. | 9 | 2 | 4 | 72 | C |
| V | Formação, dobragem e colagem do maço | <i>Cover, folding guide 1</i> | Alguma matéria prima avariada | Maços mal formados | Máquina pára. | 9 | 3 | 3 | 81 | C |
| V | Formação, dobragem e colagem do maço | <i>Inner frame in bending station</i> | Desalinhamento na mudança da bobina | Falha na estação de corte do <i>Inner frame</i> | Máquina pára. | 9 | 4 | 4 | 144 | B |
| V | Formação, dobragem e colagem do maço | <i>S blank missing</i> | Rótulos danificados na mesa | Ausência de rótulos na mesa de rótulos | Máquina pára. | 9 | 2 | 4 | 72 | C |
| VI | Secagem e transporte | <i>Discharge full</i> | Falha no sincronismo | Encalhamento. | Máquina pára. | 9 | 1 | 4 | 36 | D |
| VI | Secagem e transporte | <i>Infeed pusher, drying drum 1</i> | Maços mal formados no empurrador da primeira roda | Encalhamento. | Máquina pára. | 10 | 2 | 4 | 80 | C |
| VI | Secagem e transporte | <i>Infeed, drying drum 2</i> | Maços mal formados no empurrador da segunda roda | Encalhamento. | Máquina pára. | 7 | 3 | 4 | 84 | C |
| VI | Secagem e transporte | <i>Packet guide, discharge</i> | Maços mal formados na saída da primeira roda | Encalhamento. | Máquina pára. | 9 | 3 | 4 | 108 | B |
| VI | Secagem e transporte | <i>Packet guide, packet</i> | Maços mal formados | Encalhamento. | Máquina pára. | 7 | 3 | 4 | 84 | C |

Figura 33 - Exemplo FMECA (Fonte: Jesus, 2021)

Ainda, o fator de urgência/RPN pode ser ilustrado de acordo com a análise realizada à condição do equipamento. Deste modo, de forma ilustrativa, a figura 34, baseada na figura 25, demonstra graficamente uma escala que permite quantificar o fator de urgência/criticidade.

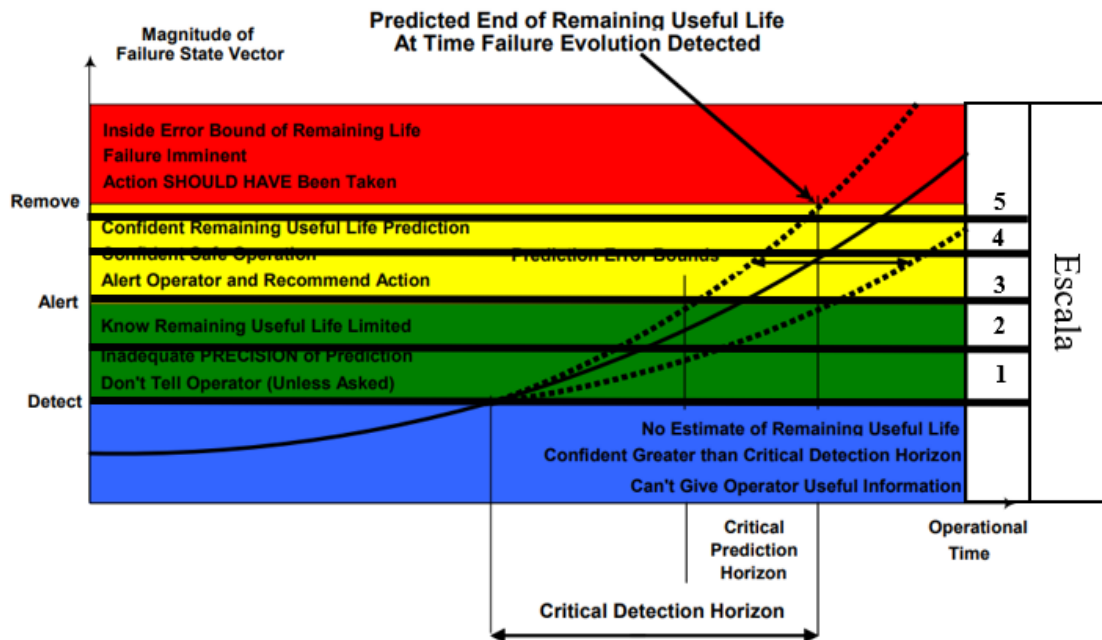


Figura 34 - Fator urgência/criticidade em função da análise de condição (Fonte: Adaptado de NASA, 2008)

Por último, o NPE permite classificar a prioridade que a organização atribui a manutenção e enquadrar nas ações a realizar. Isto é, por exemplo, se o NPE der um valor numérico superior a 37 unidades então a prioridade de manutenção é máxima/elevada e

deve ser realizada a ação de manutenção de imediato. Assim, a tabela 16 demonstra uma relação entre o NPE, a classificação, a prioridade e a ação a realizar.

Tabela 16 - NPE e classificação da prioridade de manutenção

| Classificação | Prioridade | Período de Prioridade Estratégica | Ação |
|---------------|------------|-----------------------------------|--|
| A | Elevada | $NPE > 37$ | Reparação imediata |
| B | Alta | $27 < NPE \leq 37$ | Planear / Outsourcing |
| C | Média | $12 < NPE \leq 27$ | Planear / Outsourcing |
| D | Baixa | $NPE \leq 12$ | Mantém vigilância / Outsourcing / paragem do equipamento |

A prioridade de manutenção dita que equipamento tem prioridade na manutenção com base nos fatores estratégicos definidos anteriormente. Contudo, por exemplo, se a um dado equipamento lhe for atribuído uma prioridade baixa e este apresentar, na análise de condição (CBM), um valor elevado de alarme, deve-se parar de imediatamente o equipamento e aguardar o momento oportuno de reparação ou realizar recurso ao outsourcing.

Por fim, assumindo que uma dada organização possui 3 equipamentos distintos e que apresentam as seguintes condições:

- Equipamento A: possui elevado valor estratégico e apresenta um nível de degradação elevado com previsão de elevado impacto económico;
- Equipamento B: não possui valor estratégico e apresenta um nível de degradação elevado, contudo, com baixo impacto económico;
- Equipamento C: a sua importância estratégica é considerável e a urgência de reparação é baixa, onde se prevê um impacto económico considerável.

O ODT da organização, alinhado com a gestão de topo, definiu que a organização assume o valor número três (3) para o coeficiente de importância estratégica, uma vez que depende inteiramente dos equipamentos e do que estes produzem, dois (2) para a urgência de reparação, pois importante uma política de manutenção adequada, e dois (2) para o impacto económico.

Assim, a tabela 17 ilustra a matriz de decisão do modelo supramencionado, a atribuição do NPE, bem como, da classificação de prioridade.

Tabela 17 - Modelo de decisão das prioridades na manutenção (3 fatores)

| Equipamentos | | Equipamento A | Equipamento B | Equipamento C |
|-----------------------------|------|---------------|---------------|---------------|
| Fatores de priorização | Coef | | | |
| Importância estratégica | 3 | 5 | 1 | 3 |
| Urgência/RPN | 2 | 5 | 4 | 2 |
| Impacto económico | 2 | 4 | 1 | 3 |
| Prioridade | | 33 | 13 | 19 |
| Classificação da prioridade | | B | C | C |

Assim, o NPE do equipamento A é o mais alto, seguido do equipamento C e, por fim, o equipamento B. Neste caso, o equipamento A apresenta uma alta prioridade de reparação (Classificação B) e deve começar a realizar ações de manutenção. O equipamento C apresenta o mesmo nível de prioridade que o equipamento B, contudo, com um NPE maior. Assim, o equipamento C, tendo em conta a sua considerável importância estratégica e baixa criticidade/urgência, deve ser mantida a monitorização e planeada as ações de manutenção. Por último, quanto ao equipamento B, baseado na condição de baixa importância estratégica e um elevado valor de criticidade/urgência, deve ser ponderada a paragem do equipamento e avaliar outsourcing.

3.4.2 Flexibilidade logística

A flexibilidade logística na FRACAS é a integração da variável logística na eficiência do processo. Na verdade, este fator apresenta um grande impacto na eficiência pois dele depende o fornecimento de sobresselentes e outros fatores importantes para realizar as respetivas manutenções. Assim, deve ser tido em conta e deve ser analisado com o maior cuidado para otimizar todo o procedimento e aumentar a eficiência dos procedimentos.

O modelo proposto faz recurso a ferramenta *bestsourcing* que, como mencionado anteriormente, é a ferramenta que conjuga a melhor fonte de fornecimento para a situação pendente. O *bestsourcing* na manutenção depende essencialmente de três (3) grandes características, que são a capacidade que uma organização apresenta para realizar a tarefa, o custo da tarefa e a criticidade do equipamento ou sistema alvo de manutenção. Esta última, tem uma relação estreita com a importância estratégica do ativo físico para a

organização, uma vez que, se o equipamento se apresenta como crítico então tem uma importância estratégica.

A resolução de avarias de forma interna subordina-se a existência de competência residente na organização e sobresselentes necessários para as tarefas de manutenção. Assim, deve ser feito um levantamento de todos os equipamentos críticos a organização e perceber o nível de manutenção (AFNOR) necessário, de acordo com tabela 3. De seguida, deve ser avaliado os custos internos e externos, sendo que os custos internos deve contemplar a aquisição do material, logística, custos de posse de stock, custo de armazenagem, custo de formação e custo de mão-de-obra interna. O stock deve ser avaliado na necessidade de resposta imediata e deve ser assumido o valor mínimo na manutenção para responder as ações tidas como críticas, assumindo como essencial o custo de posse do stock.

Deste modo, se o equipamento se apresenta como crítico (elevado valor estratégico), a organização deve preferencialmente optar por realizar a manutenção de forma interna e não depender de terceiros. Se não existir competência para realizar essas ações, deve ser ponderada a aquisição de formação e, quando não se justificar, deve-se estabelecer protocolos flexíveis que permitam rápida resposta.

Ao invés desta, se o equipamento não tiver valor estratégico para a organização, então o custo agregado irá determinar a fonte de financiamento. Isto é, se o custo das ações de manutenção for menor internamente, então deve ser feito com recurso ao *insourcing*. Se o custo das ações de manutenção for menor externamente, então deve ser feito com recurso a *outsourcing* e, preferencialmente, deve-se estabelecer protocolos que permitam criar uma relação empresarial “*win-win*”.

Assim, a tabela 18 permite apoiar na decisão no tipo de fonte/recurso logística e, assim, incrementar flexibilidade operacional através do modelo que melhor se ajusta as necessidades organizacionais.

Tabela 18 - Modelo de decisão de fontes logísticas

| Equipamentos e ações de manutenção | Competências existentes | Onde apresenta menor Custo? | Tipo de Recurso |
|------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|--|
| São críticos? | | | |
| Sim | Interno | Interno | <i>Insourcing</i> |
| | Externo | - | A avaliar. |
| | Interno e externo | Interno | <i>Insourcing</i> |
| | Interno e externo | Externo | <i>Insourcing</i> |
| Não | Interno | Interno | <i>Insourcing</i> |
| | Externo | - | <i>Outsourcing</i> |
| | Interno e externo | Interno | <i>Insourcing. Avaliar Prioridade organizacional</i> |
| | Interno e externo | Externo | <i>Outsourcing</i> |

Na prática, quando os elementos são críticos a existência da organização, isto é, apresenta valor estratégico e competitivo, então a organização não deve depender de subcontratação ou de parcerias estratégicas organizacionais, mas deve garantir que adquira o conhecimento necessário e sobresselentes necessários para realizar a manutenção o mais rápido possível. É imperativo que sejam adquiridos os bens e competências para realizar a manutenção de equipamentos críticos pois destes depende a sustentação organizacional e pode infligir danos económicos permanentes.

Por fim, quando os equipamentos não são críticos, o valor agregado a ação de manutenção é determinante no tipo de recurso a utilizar, havendo uma prevalência ao outsourcing, quando este não se apresenta como *core business* organizacional.

3.5 Modelo FRACAS proposto

O modelo FRACAS proposto integra as ferramentas e filosofias abordadas ao longo do capítulo 3. Como já mencionado, as ferramentas de mapeamento de processos e SOP podem ser aplicadas, de forma individual ou combinadas, ao longo de todas as etapas do processo de modo a aumentar a eficiência dos procedimentos. O *software* de gestão da manutenção (CMMS) é determinante na melhoria do FRACAS e é integral em todas as etapas do processo.

De forma geral, as ferramentas do RCM integram etapas específicas, nas quais as suas valências e funções permitem aumentar a funcionalidade do modelo convencional. Assim, o modelo proposto integra 11 etapas, ilustradas esquematicamente pela figura 37, que são descritas nos seguintes pontos:

1. Manutenção centrada na análise de controlo de condição (CBM). O CBM integra a análise do controlo de condição do equipamento a partir dos métodos de inspeção mencionados subcapítulo 2.6. Esta etapa é composta por subfases que devem ser apoiadas, de forma integral e cíclica, pelo controlo de condição da filosofia CBM. As subfases são as seguintes:
 - a. Observação da falha. A falha deve ser observada através de testes de condição realizados na frequência definida ou outro tipo de sintomas de perda de rendimento ou anomalia;
 - b. Documentação da falha. A falha observada é totalmente documentada. Se a organização tiver acesso à ferramenta CMMS, então esta fase deve integrar integralmente nesta ferramenta;
 - c. Verificação de falhas. Nesta fase irá ser feita a reconfirmação e assim validar a observação inicial da falha. A confirmação é feita com recurso ao CBM;
2. Isolar as falhas. No isolamento da falha é feita a localização da falha no item/componente defeituoso;
3. Verificar se a falha resulta do item suspeito. Nesta fase é pretendida uma rápida inspeção ao equipamento por forma a verificar a origem do problema. Verifica-se se a falha potencial, com a perda de desempenho, é originada a partir do item que se perspetivou;
4. Análise de falhas do item defeituoso. Este procedimento é realizado por forma a conhecer o mecanismo de falha interna responsável pela falha observada ou modo de falha. Nesta etapa o ODT fará recurso a ferramenta FMECA, árvore de falhas ou RCM;
5. Pesquisa dos dados. A pesquisa de dados existentes é feita para descobrir ocorrências de falhas semelhantes neste ou em itens/componente relacionados (ou seja, estabelecer a perspetiva histórica do modo de falha/mecanismo de falha observado). Se o histórico estiver integrado no software de gestão de manutenção a consulta torna-se menos dolorosa e complexa;

6. Determinar a causa raiz. A causa raiz da falha observada é determinada pelo órgão de cariz técnico responsável (Núcleo técnico - ODT), a partir dos dados oriundos das etapas 4 e 5.
7. Determinar a ação de manutenção necessária, mudança na produção, mudança no processo, mudança no procedimento, etc., para evitar a repetição de falhas futuras. A decisão sobre a ação de manutenção adequada deve ser tomada pelo órgão de decisão técnica (ODT).
8. Aplicar as ações de manutenção conforme definido pelo órgão responsável.
9. Teste de desempenho operacional. Nesta etapa é feito um reensaio do sistema/equipamento com a modificação proposta da ação de manutenção incorporada. Este ensaio é feito conjugado com os testes de inspeção de controlo de condição, por forma a perceber se existe uma alteração dos parâmetros defeituosos e um retrocesso ao normal funcionamento e corrente desempenho do equipamento.
10. Determinar a eficácia da ação corretiva. Após o reensaio e revisão de todos os dados das ações aplicadas, é determinado se a ação manutenção proposta é eficaz. A eficácia da ação corretiva é feita com recurso a parâmetros de desempenho e com recurso a análise de condição do equipamento. Se os valores de condição obtidos forem o nível normal de funcionamento e, em simultâneo, o nível de desempenho for recuperado considera-se que as ações corretivas foram eficazes.
11. Incorporação da ação de manutenção. Após a eficácia da ação corretiva proposta ter sido comprovada, a ação de manutenção é então incorporada nos sistemas/equipamentos e é realizado o respetivo relatório de manutenção.

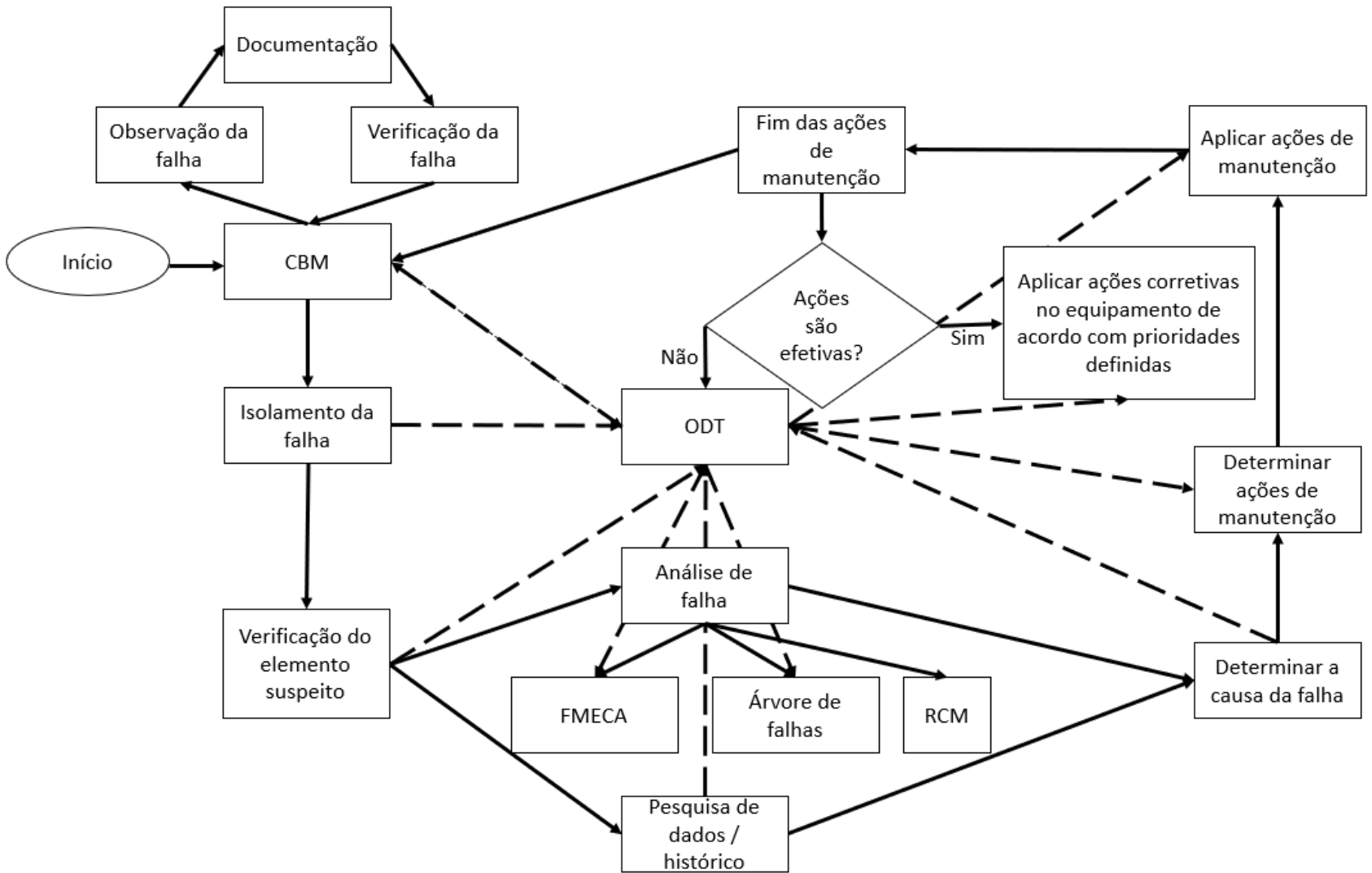


Figura 35 - Modelo de FRACAS proposto

No decorrer do circuito fechado o ODT tem as responsabilidades mencionadas no subcapítulo 3.4, onde se destaca a análise das prioridades e coordenação da paragem do equipamento. Na prática, absorve a competência da gestão do sistema FRACAS e deve fazer-se representar por elemento do departamento de manutenção, departamento de fiabilidade e departamento financeiro de uma determinada organização.

Por último, a tabela 19 permite ilustrar as diversas tarefas, os responsáveis da ação e ferramenta adicional ao processo por cada uma das fases que se segue.

Tabela 19 - Detalhes do modelo FRACAS proposto

| <i>Etapa</i> | <i>Tarefa</i> | <i>Responsabilidade</i> | <i>Informação</i> | <i>Ferramenta adicional ao processo</i> |
|--------------|---|-------------------------|--|--|
| 1 | CBM | ODT | Análise de condição. Nível de dano. Nível de degradação e alarme | - CBM - SOP - CMMS |
| 1.a | Observação da falha | ODT | Observação do artigo/ Dados/ Tempo/ Localização/ Ambiente | - CBM - CMMS |
| 1.b | Documentação da falha | ODT | Descrição de falhas | - Mapeamento de processos - SOP - CMMS - CBM |
| | | | Causa raiz esperada | |
| 1.c | Verificação da falha | ODT | Lista de verificação (Check list) | - SOP; -CBM - CMMS |
| 2 | Isolar as falhas | ODT | Modo de falha | - CBM - CMMS |
| 3 | Verificar se a falha resulta do item suspeito | ODT | Descrição da reparação; | - CBM; - CMMS. |
| | | | Relatório de verificação | |
| 4 | Análise de falhas do item defeituoso | ODT | Método de análise | - FMECA - Árvore de falhas - Outras ferramentas da RCM consideradas como úteis |
| | | | Relatório de análise | |
| 5 | Pesquisa dos dados | ODT | Pesquisa na base de dados; | - CMMS |
| | | | Resultado | |
| 6 | Determinar a causa raiz | ODT | Mecanismo Raiz | - Relatório e definição de prioridade |
| | | | Identificação da causa | |
| 7 | Determinar a ação corretiva necessária | ODT | Resultado da análise | - CMMS; - Matriz de decisão operacional (NPE) e logística |
| 8 | Incorporação da ação de manutenção | ODT | Especificações da ação | - CMMS |
| 9 | Teste de desempenho operacional | ODT | Relatório do desempenho | - CBM; - CMMS. |
| 10 | Determinação da eficácia das ações corretivas | ODT | Resultado da eficácia | - CBM; - CMMS. |
| 11 | Incorporação da ação corretiva e relatório | ODT | Especificações da ação | - CBM; -CMMS. |

4 Validação do modelo

Neste capítulo é pretendido validar o modelo proposto no capítulo anterior e demonstrar as vantagens em comparação ao modelo convencional. O modelo apresentado é um modelo complexo que influencia em múltiplas componentes organizacionais como as operações de manutenção, coordenação e logística. Assim, tem de ser analisado num todo e compreender a abrangência multidisciplinar que o modelo proposto apresenta.

Ainda, o presente capítulo pretende ilustrar, para além da uma análise entre os dois modelos, a análise da eficiência e eficácia do modelo apresentado. Para isso, será feito recurso aos indicadores de manutenção e fiabilidade para ilustrar o desempenho do modelo proposto. Também, nesta fase, será feita uma análise cuidada do impacto económico que a utilização de cada modelo tem para a organização por forma a analisar os múltiplos fatores de uma organização.

Por último, o modelo não irá ser analisado através de resultados obtidos na sua aplicação prática. Ao invés deste modo, será feita uma avaliação com previsões e resultados teóricos conjecturados seguindo-se de uma análise racional e crítica.

4.1 Comparação do modelo proposto com o modelo convencional

A comparação entre dois modelos terá de assentar nas etapas críticas ao longo do processo. Assim, considera-se as principais fases do FRACAS as seguintes:

- Fase I - Identificação da falha, relato de falhas e recolha de dados: Esta fase é o início de todo o processo.
- Fase II - Análise de causa raiz e definição de ações corretivas: Esta fase tem um caráter técnico e é a fase onde serão analisadas as causas raiz e definidas a ação corretiva necessária.
- Fase III - Definição de prioridades e implementação das ações de manutenção: Aqui, serão definidas as prioridades de acordo com as necessidades organizacionais e as ações corretivas são implementadas no projeto para prevenir a recorrência das falhas.

4.1.1 Identificação da falha, relato de falhas e recolha de dados

O processo de identificação da falha, relato de falhas e coleta de dados é o ponto de partida do FRACAS e a fase mais sensível do projeto. É considerado a chave do processo, pois é a partir deste momento que são desencadeadas as demais etapas desta metodologia e, quanto mais cedo for detetada a falha funcional, menor os danos no equipamento e menor o impacto económico imputado a organização.

Assim, a figura 38 ilustra a fase I mencionada no presente capítulo, onde a figura 38-a demonstra o modelo apresentado na dissertação e a figura 38-b explana o modelo convencional.

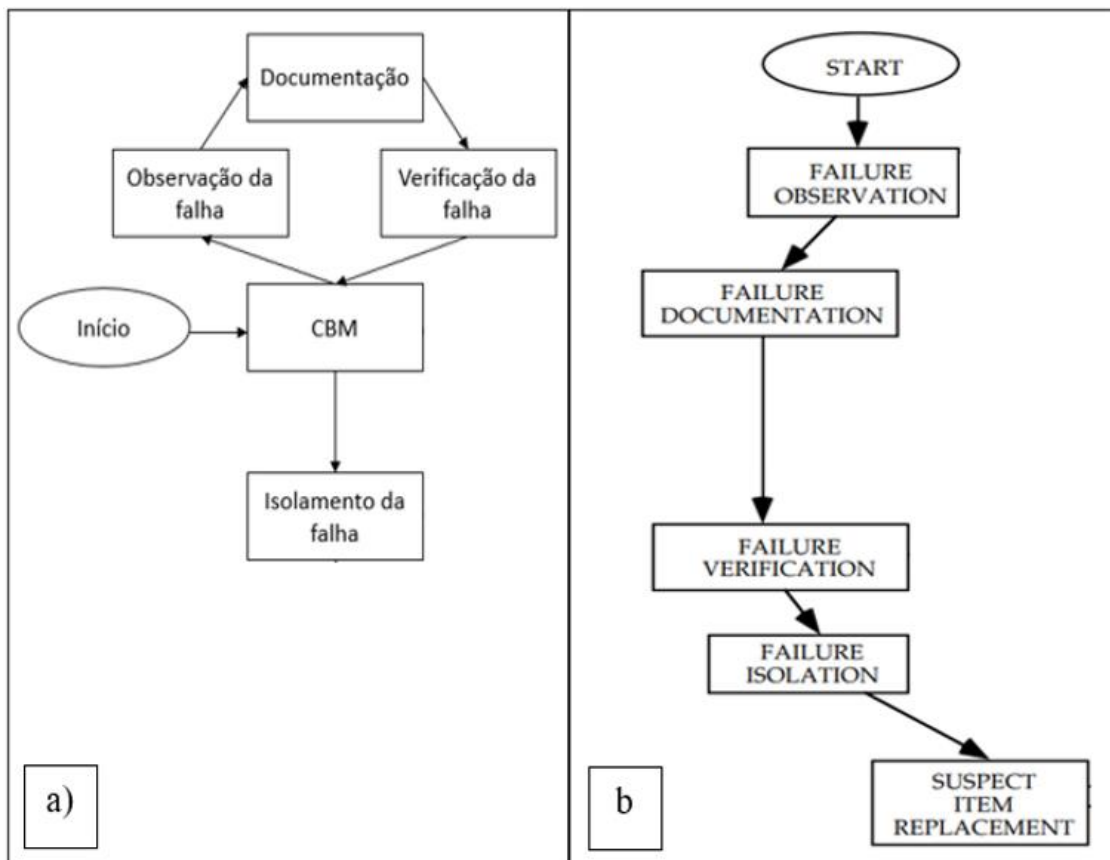


Figura 36 - Fase da identificação da falha, relato de falhas e coleta de dados (Fase I): a) modelo proposto; b) modelo convencional

Analisando individualmente cada sistema, é possível depreender que no modelo convencional (figura 38-b) a deteção de falha depende da sensibilidade e experiência do operador. Assim, enquanto o equipamento não transmitir sintomas físicos notórios de degradação, o processo não é iniciado. Na verdade, maior parte das vezes que o equipamento chega a esta fase, a degradação dos sistemas já é manifestamente elevada e, normalmente, é uma falha funcional acentuada que limita definitivamente o equipamento.

A equação 16 e 17 permite ilustrar que, através do recurso ao CBM, o modelo proposto tem menor tempo de espera e, conseqüentemente, menor MTWT. A equação 18 e 19 demonstra que o modelo convencional, que depende da sensibilidade do operador, possui um tempo de espera maior e, naturalmente, tem um MTWT maior. Por fim, logicamente, que o tempo médio de espera do modelo proposto ($MTWT_{Mod.Proposto}$) é inferior ao tempo médio de espera do modelo convencional ($MTWT_{Mod.Convencional}$) como demonstra a equação 20.

Modelo proposto:

$$CBM \Rightarrow \downarrow \text{Tempo de deteção da falha} \Rightarrow \downarrow \text{Tempo total de espera} \quad (16)$$

$$\Rightarrow \downarrow MTWT_{Mod.Proposto} = \frac{\downarrow \text{Tempo total de espera}}{\text{Número de avarias}} \quad (17)$$

Modelo convencional:

$$\text{Sensibilidade do operador} \Rightarrow \uparrow \text{Tempo de deteção da falha} \Rightarrow \uparrow \text{Tempo total de espera} \quad (18)$$

$$\uparrow MTWT_{Mod.Convencional} = \frac{\uparrow \text{Tempo total de espera}}{\text{Número de avarias}} \quad (19)$$

Assim,

$$MTWT_{Mod.Proposto} < MTWT_{Mod.Convencional} \quad (20)$$

O modelo proposto influencia também o tempo de reparação, área 2 na figura 39. Se a falha for detetada mais cedo que no modelo convencional, é possível realizar a análise da causa raiz, abordada no seguinte subcapítulo, e planear as ações de manutenção sem existir a paragem do equipamento. Na verdade, o CBM poderá contribuir para este facto numa fase inicial, pois é possível planear as ações antes de o equipamento parar. Contudo, esta fase será abordada, de forma discriminada, no subcapítulo seguinte.

Por fim, com o controlo de condição, é possível prever a falha e executar as etapas supramencionadas mantendo o equipamento em funcionamento, reduzindo ao máximo o tempo de offset. A máquina ficará em funcionamento dependendo do nível de condição e do alarme que o equipamento apresenta. Isto implica que existe mais tempo para preparar as ações de manutenção e, naturalmente, o tempo será menor quando comparado com uma falha inesperada sem qualquer preparação.

Assim sendo, para o modelo proposto, se o tempo total de espera (MWT) diminuir e o tempo de reparação diminuir (MTTR), então a disponibilidade do equipamento vai aumentar. A equação 21 ilustra a premissa do aumento da disponibilidade do modelo proposto quando comparado com o modelo convencional.

$$\uparrow Disp_{Mod.proposto} = \frac{MTBF}{MTBF + \downarrow MTTR + \downarrow MWT} * 100 (\%) \quad (21)$$

Além das vantagens mencionadas, o modelo proposto permite reduzir o impacto económico que o alastramento da avaria pode provocar. Isto é, quanto mais tempo o equipamento funciona em condições não normais mais vai danificar subsistemas dependentes do sistema. Este tipo de situações pode ter um impacto extremo quando existe uma falha funcional e, conseqüentemente, uma paragem no equipamento, que se traduz numa falta de produção e perda económica.

Na recolha de dados, o modelo proposto contribui na melhoria da eficiência do processo FRACAS, pois define claramente quais as ações a realizar e as informações que deve recolher. A semelhança do modelo convencional, o modelo proposto contempla um relatório de falhas que obriga o operador a preencher campos com informação crítica ao diagnóstico da avaria.

No âmbito de reportar a avaria, o modelo proposto permite fazer recursos a vários tipos de ferramentas. Na verdade, por exemplo, com recursos a softwares dedicados a manutenção (CMMS) a informação circula em instantes até aos órgãos de decisão, desencadeando o processo de uma forma mais célere. Ao invés desta, o modelo convencional requer que a circulação transite através do relatório de falha até ao elemento de decisão, o que pode demorar tempo, dependendo da dimensão da organização e da forma como a informação flui nos canais de comunicação definidos.

Em resumo, é possível concluir, teoricamente, que o método FRACAS proposta contribui para aumentar a eficácia e eficiência, encurtando os tempos de espera e os tempos de reparação com um diagnóstico prévio. Ainda, define claramente os processos o processo o que permite a que qualquer pessoa sem experiência consiga realizar a tarefa sem comprometer a recolha de dados e permite melhorar a forma de transmissão da informação com recurso a um *software* específico. Ao invés deste, o método convencional depende da sensibilidade do operador o que faz com que a eficiência e eficácia dependa em exclusivo da competência deste. No mundo atual em que as posições de trabalhos

sofrem alterações contantes com a elevada rotação dos funcionários das organizações, é ainda mais crítico, pois, a falta de experiência pode influenciar negativamente o processo.

4.1.2 Análise de Causa Raiz e definição de ações corretivas

A análise da causa raiz influencia diretamente na eficácia das ações corretivas. Uma correta análise da causa e um bom diagnostico podem contribuir para que um dado sistema permaneça mais tempo sem avarias e, conseqüentemente, aumentar a sua fiabilidade.

O modelo proposto conta com a integração da filosofia RCM que agrega as ferramentas FMECA e Árvore de falhas que, utilizadas de forma complementar, contribuem em muito na percentagem de sucesso da determinação da causa da falha. O método convencional não delimita as ferramentas utilizadas e ficará à consideração dos engenheiros e técnicos que integram o conselho revisão de falha (FRB). Assim, figura 40 ilustra a fase II, mencionada no presente capítulo, do modelo proposto.

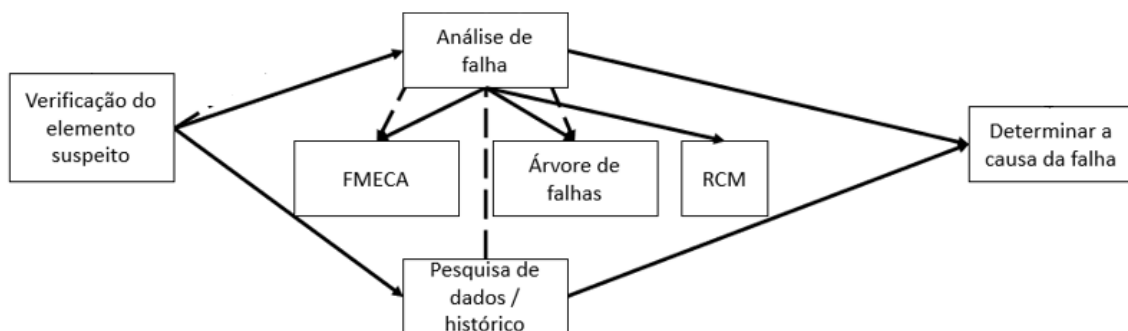


Figura 38 - Fase da Análise de causa raiz e definição de ações corretivas (Fase II) do modelo proposto

Nesta fase do processo, as ações dos modelos terão influência no tempo média de reparação (MTTR), bem com, no tempo médio até a próxima falha (MTTF). No tempo médio de reparação, pois uma análise de falha eficiente combinada com um planeamento antecipado da análise de condição, permite diminuir o tempo de reparação. No tempo médio até a falha (MTTF), pois este pode ser influenciado por uma determinação da causa de falha eficaz e por uma ação de manutenção eficaz, embora também possa ser afetado por outros fatores.

Assim, a semelhança da figura 39, a figura 41 ilustra a verde o impacto que o modelo proposto tem nos diversos indicadores de fiabilidade e manutenção, onde a “Área 2”, que coincide com a fase I, e a “Área 3” são influenciadas diretamente pelas ferramentas que integra o modelo proposto na fase II.

nos estudos já realizados para causas semelhantes, poderá ter pouca fiabilidade uma vez que os sintomas determinados podem ser imprecisos ou errados.

Assim, sendo o tempo de reparação (MTTR) menor, devido aos factos supramencionados, irá aumentar a disponibilidade do equipamento. Também, sendo a disponibilidade do equipamento maior implica uma maior eficácia da manutenção. De forma conseqüente, a empresa terá um maior lucro, uma vez que reduzirá aos tempos de *offsets* não produtivos. A equação 22 ilustra a influência da diminuição que o período de reparação (MTTR) tem no aumento da disponibilidade (Disp) do equipamento.

$$\uparrow Disp_{Mod.proposto} = \frac{MTBF}{MTBF + \downarrow MTTR + MWT} * 100 (\%) \quad (22)$$

Além desta, a fiabilidade também é um fator que fica indiretamente influenciado. Esta, deve-se ao facto de assumirmos que irá existir um aumento na probabilidade de deteção das falhas e uma manutenção mais eficaz. Conseqüentemente, irá haver uma diminuição no número de componentes que falharam por acontecimentos semelhantes e, da mesma forma, irá diminuir a probabilidade de falha (F) como ilustra a equação 23.

$$\downarrow F = \frac{\downarrow N^{\circ} \text{ de componentes que falharam } (t)}{N^{\circ} \text{ total de componentes}} \quad (23)$$

Com base na equação 5, podemos concluir que, de forma proporcional, se existe uma diminuição da probabilidade de falha, então existe um aumento da fiabilidade. Assim, a integração das ferramentas do RCM e CBM influenciam indiretamente num aumento da fiabilidade do equipamento.

Por fim, é notório que as ferramentas adequadas para uma eficaz análise correção influenciam a disponibilidade do equipamento e, conseqüentemente, uma melhoria no processo. Assim, posso concluir que teoricamente o modelo proposto irá aumentar a eficiência e eficácia do processo na análise da causa raiz e identificação de ações de manutenção.

4.1.3 Definição de prioridades e implementação das ações de manutenção

Numa organização com muitas solicitações e várias prioridades é importante definir, no início, o que é realmente essencial para a organização e para a estratégia

organizacional. Na manutenção quando por motivos como a escassez de recursos humanos, materiais ou financeiros não é possível resolver as múltiplas falhas, existe a necessidade priorizar as ações que criam valor e permitam a organização sobreviver ou prosperar no ambiente competitivo que esta inserida.

Nesta fase, o modelo convencional não faz qualquer menção a priorização das ações de manutenção. O que não permite definir as prioridades na implementação das ações corretivas. Assim, quando existe situações onde há falta de recursos e seja necessário priorizar, não é possível avaliar o impacto da decisão selecionada e pode implicar danos económicos elevados, derivado da falta de conhecimento técnico ou tempo.

Por outro lado, o modelo FRACAS proposto, permite definir, de forma clara, as prioridades da empresa e assenta em três (3) vetores/critérios principais a decisão, que são a importância estratégica que o sistema tem, a urgência/criticidade da ação de manutenção e o impacto económico que apresenta. Esta abordagem permite valorizar as ações que criam valor organizacional e organizar a demanda de acordo com o que é indispensável a organização. Este modelo aumenta o sucesso da implementação do FRACAS uma vez que se aplica no contexto real e combate um dos maiores problemas da ferramenta, que é a falta de priorização.

Por último, o sistema de priorização apresentado pelo modelo proposto permite que sejam realizadas as ações necessárias de acordo com a visão estratégica da empresa e vai de encontro com a necessidade de sobrevivência e lucro da mesma. No sistema de manutenção, tem um impacto positivo pois permite priorizar os equipamentos que mais criam valor a organização.

5 Conclusão

Neste capítulo serão efetuadas as conclusões retiradas ao longo da presente dissertação. Ainda, serão mencionados os objetivos que foram alcançados, principais desafios e trabalhos futuros, que podem contribuir para aprimorar o sistema FRACAS apresentados ao longo do presente trabalho.

Na dissertação foram identificados, essencialmente, quatro grandes problemas na aplicação e utilização do FRACAS convencionais, que são:

- Interação de organização complexa;
- Identificação das falhas e rastreio de dados ineficientes e ineficazes;
- Ausência de objetivos prioritizados;
- Problemas logísticos;

Após identificar as falhas como parte do problema convencional, foram apresentadas ferramentas, métodos e filosofias para resolver as limitações supramencionadas. Desta forma, o RCM, a CBM, o SOP, mapeamento de operações, CMMS, FMECA, árvore de falhas entre outras ferramentas RCM, permitem mitigar, na máxima extensão possível, os problemas supramencionados.

Assim, o modelo apresentado assenta numa análise de condição através de métodos de avaliação de condição, que permite identificar sintomas de avaria e prever uma falha potencial. Este método, permite detetar a falha de forma prematura o que admite iniciar todas as demais fases num período precoce. Consequentemente, permite ter mais tempo para planear as ações e preparar a logística necessária diminuindo o tempo de *offset*, pois é possível prever quando ocorrerá a falha funcional. Assim, teremos um tempo de espera reduzido e um tempo de reparação manifestamente inferior, quando comparado com a não utilização deste método.

Ainda, numa fase mais avançada do processo, o recurso a ferramentas de fiabilidade na manutenção e a filosofia da RCM, permite que a análise da causa raiz e identificação das falhas ocorra com um menor erro possível. Esta ação potencializa o sucesso da reparação, diminuindo a probabilidade de avaria da mesma causa e permite identificar um maior leque de causas raízes, mitigando problemas semelhantes.

Ao invés deste, o método convencional baseia a identificação da falha na sensibilidade do operador, isto é, o operador terá de perceber aspetos físicos notórios que, em última instância, só podem ser percebidos quando já se encontrarem numa

falha funcional. Com um offset inesperado e na iminência de uma manutenção corretiva, é necessário iniciar todo o processo de identificação da falha, identificação logística e definição de ações de manutenção, o que implica maior tempo de espera. Quanto maior o tempo de espera, mais ineficiente é o processo e maior o impacto económico que advém da paragem do equipamento. Aliado a este, perante uma inesperada falha torna complexo o planeamento das ações corretivas de forma eficiente e aumenta o tempo de reparação.

Deste modo, quando comparado os dois métodos, é possível concluir, teoricamente, o seguinte:

- O método proposto permite identificar a falha antes do método convencional. Na prática, se a falha for detetada imediatamente a seguir a perda de rendimento, tendo por base a análise de condição, é possível continuar a funcionar com o equipamento e em simultâneo desencadear as requisições e ações necessárias para as ações de manutenção. Esta traduz-se num aumento de eficiência e eficácia do processo;
- Para a mesma limitação apresentada no ponto anterior, o método proposto apresenta menor tempo de espera e menor tempo de reparação que o método convencional, o que se traduz num aumento de eficiência do processo;
- O rastreio dos dados também se apresenta como um elemento complexo e ineficaz na metodologia FRACAS convencional. O modelo proposto, com recurso a análise de condição, permite uma monitorização contante da condição do equipamento, o que aumenta a eficiência e eficácia do rastreamento dos dados da falha potencial/funcional;
- O modelo proposto permite um nível de gestão logístico superior ao convencional. Isto é, através da matriz de decisão logística é possível aumentar a flexibilidade logística e resolver, consoante a visão estratégica organizacional, as limitações que maior impacto tem na organização;
- Para a ausência de objetivos, o modelo convencional não contempla prioridade nas ações e, devido a este facto, apresenta-se como uma lacuna enorme na sua aplicação. Ao invés deste, o modelo proposto permite priorizar as ações de manutenção de acordo as prioridades definidas pela organização. Esta ação, terá um impacto positivo na gestão da manutenção do equipamento de uma organização, permitindo otimizar os recursos existentes nas necessidades iminentes;

- O modelo proposto assenta na filosofia RCM, o que permite aumentar a probabilidade de sucesso na identificação da falha, bem como, aumentar a fiabilidade do histórico. Este fator pode apresentar-se como determinante uma vez que será uma base para identificação de futuras avarias;
- O modelo proposto integra o CMMS como elemento mitigador da complexidade da interação organizacional, o que permite que a informação circule até aos elementos de ação de uma forma momentânea e desejada. O modelo convencional não contempla este tipo de ferramentas e por isso a complexidade organizacional apresenta-se como um problema de na aplicação do FRCAS convencional;
- Ainda, no modelo proposto, são inseridas ferramentas como o mapeamento de processo e SOP o que permite definir linhas orientadoras nas ações e mitigar o erro da informação que é necessária. Permite também colmatar lacunas como a falta de experiência ou sensibilidade do operador. Deste modo, estas ferramentas aumentam o nível de eficiência do processo.

Por fim, a elaboração da presente dissertação conjugado com a situação profissional, pessoal e académica que apresento, impediram uma aplicação prática do modelo e validação, com indicadores de desempenho, do modelo proposto. Ainda, a complexidade do sistema aliada a reduzida informação disponível sobre o FRACA limitam o desenvolvimento da metodologia para modelos futuros. Da mesma forma, a construção de um FRACAS que permite aplicar e conjugar várias frentes de gestão como as operações, logística ou gestão de prioridades, é bastante complexa. Mais, torna-se ainda mais limitante criar um FRACAS modular a organizações com diferentes visões estratégicas.

5.1 Trabalhos Futuros

O FRACAS é bastante complexo, contudo pode tornar-se um forte aliado na manutenção das organizações. Como foi mencionado, o FRACAS é uma metodologia amplamente invocada, mas não existem muitos estudos que permitam melhorar e adaptar-se as necessidades industriais atuais.

Assim, por forma a contribuir para um incremento e adaptação tecnológica desta ferramenta as necessidades atuais, recomendo os seguintes trabalhos futuros:

- Aplicar a filosofia do *lean six sigma* ao processo FRACAS;
- Contemplar o nível de alarme do controlo de condição a urgência de reparação;
- Integrar conceitos da “Indústria 4.0 ou 5.0”;
- Integrar da inteligência artificial (IA).
- Aplicação prática.

O *lean six sigma* é uma ferramenta atual, amplamente utilizada no mundo industrial moderno e com carácter de melhoria contínua. Embora não represente uma vertente operacional do processo, esta ferramenta contribui para melhorar o desempenho do processo. Assim, seria de todo proveitoso a sua aplicação, pois iria eliminar fases do processo que possam estar a diminuir ao desempenho da ferramenta e, conseqüentemente, aumentaria a eficiência e eficácia do FRACAS.

O CBM permite acompanhar e prever o nível de degradação de um dado componente. Para trabalhos futuros, seria de todo proveitoso contemplar o nível de degradação do equipamento, isto é, contemplar o nível de alarme ou valor normalizado de degradação e integrar no modelo de decisão para seleccionar a prioridade de manutenção.

A indústria 4.0 é um conceito extremamente moderno e apresenta-se como marco industrial onde as máquinas comunicam entre si. Esta perspetiva inovadora é diferenciada para aumentar a eficiência e eficácia dos processos, pois através de ferramentas como a automação e ferramentas como a “internet das coisas” é possível acelerar o processo de decisão e ação da ferramenta já existente.

A IA é a ferramenta do momento no mundo das tecnologias de informação (TI) e permite a um computador receber estímulos e dar respostas adaptando-se a fatores externos e meio envolvente. Esta ferramenta permite ao FRACA autonomamente planear e tomar decisões, correndo algoritmos e modelos de decisão implementados. Assim, tendo em conta o contexto organizacional, visão organizacional e modelos programados é possível tomar decisões operacionais e logísticas de uma forma mais célere aumentando a eficiência do processo e, no melhor cenário, eficácia do processo.

Por fim, a aplicação prática é importante para validar o modelo em todas as componentes. Seria extremamente benéfico a sua aplicação num contexto real da indústria moderna e, de igual modo, analisar os indicadores de desempenho da fiabilidade da manutenção. Desta forma, seria possível consolidar ainda mais o modelo proposto validando de forma credível a sua composição.

Referências

- AR&M. (2012). *GR-77: Applied R&M Manual for Defence Systems*. Availability, Reliability and Maintainability community.
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2003). *UNE 66175 - Sistemas de gestão da qualidade. Guia para implementar sistemas de indicadores*. AENOR.
- Association Française de Normalisation. (2016). *NF X60-000 - Maintenance industrielle - Fonction maintenance*. AFNOR.
- Blanchard, B. S., Verma, D., & Peterson, E. L. (1995). *Maintainability : a key to effective serviceability and maintenance management*. John Wiley & Sons.
- Bloom, N. B. (2005). *Reliability Centered Maintenance (RCM): Implementation Made Simpl* (1st ed.). McGraw Hill. <https://doi.org/10.1036/0071460691>
- Branco, R. F. (2008). *O Movimento da Qualidade em Portugal*. Vida Económica.
- Cabral, J. P. S. (2006). *Organização e Gestão da Manutenção* (6th ed.). LIDEL.
- Canuto, R. M. F. (2009). *As Melhores Práticas de Gestão para a Melhoria da Fiabilidade Operacional* [Dissertação de doutoramento]. Universidade Aberta. <http://hdl.handle.net/10400.2/1489>.
- Cato, W. W., & Mobley, R. K. (2001). *Computer-Managed Maintenance Systems: A Step-by-Step Guide to Effective Management of Maintenance, Labor, and Inventory* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Chiavenato, I. (2014). *Gestão de Pessoas - O novo papel dos recursos humanos nas organizações* (Vol. 4). Manole Ltda.
- Ciemian, M. (2008). Increasing the effectiveness of FRACAS. *2008 Annual Reliability and Maintainability Symposium*. <https://doi.org/10.1109/RAMS.2008.4925770>
- Criscimagna, N. H. (1995). *Benchmarking Commercial Reliability Practices*. Defense Technical Information Center. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA310563>. Acedido em 27/09/2023.
- Cruz, C. (2009). *Balanced Scorecard: Concentrar uma Organização no que é essencial*. Vida Económica.
- Department of Defense, U. S. (1980). *Reliability Program For Systems And Equipment Development And Production* (B).
- Department of Defense, U. S. (1985). *Failure Reporting, Analysis and Corrective Action System*.

- Department of Defense, U. S. (1989). *Military Standard - Maintainability Program For Systems And Equipment* (B).
- Department of Defense, U. S. (1998). *Electronic Reliability Design Handbook*.
- Dias, M. J. M. (2013). *Fiabilidade de centros de maquinação - um caso de estudo* [Dissertação de mestrado]. Universidade de Aveiro. <http://hdl.handle.net/10773/13314>.
- Dunn, S. (2015). *Maintenance Outsourcing - Critical Issues*. *Plant Maintenance ResourceCenter*. https://www.plant-maintenance.com/outsourcing_crit_issues.shtml. Acedido em 30/09/2023.
- Ferreira, H. da C. (2020). *Indicadores de desempenho da manutenção dos navios da Marinha* [Dissertação de mestrado]. Escola Naval. <http://hdl.handle.net/10400.26/33688>.
- Ferreira, L. A. (1998). *Uma Introdução à Manutenção* (2nd ed.). Publindústria.
- Filipe, F. M. C. (2006). *Gestão e organização da manutenção, de equipamento de conservação e manutenção de infra-estruturas ferroviárias* [Dissertação de mestrado]. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. [https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/12374/2/Texto integral.pdf](https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/12374/2/Texto%20integral.pdf).
- Fogliatto, F. S., & Ribeiro, J. L. D. (2011). *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. Elsevier Editora Ltda.
- Ford Motor Company. (1995). *Potential failure mode and effects analysis (FMEA) reference manual*. (2nd ed.). Ford Motor Company .
- Grönqvist, D. (2013). *Applying Lean Service Concepts to the Fault Reporting, Analysis, and Corrective Action System A Case Study at an Engineering Firm*. KTH Industrial Engineering and Management.
- Hallquist, E. J., & Schick, T. (2004). Best practices for a FRACAS implementation. *Annual Symposium Reliability and Maintainability, 2004 - RAMS*, 663–667. <https://doi.org/10.1109/RAMS.2004.1285523>
- Instituto Português da Qualidade. (2007). *Norma portuguesa – NP EN 13306:2007 – Terminologia da Manutenção*. IPQ.
- Instituto Português da Qualidade. (2009). *Norma portuguesa – NP EN 15341:2009 – Indicadores de Desempenho da Manutenção (KPI)*. IPQ.
- Instituto Português da Qualidade. (2015). *NP EN ISO 9000:2015 - Sistemas de gestão da qualidade - Fundamentos e vocabulário*. IPQ.


- Ireson, W. G., Coombs, C. F., & Moss, R. Y. (1995). *Handbook of Reliability Engineering and Management* (2nd ed.). McGraw Hill.
- Jesus, A. R. de. (2021). *Manutenção centrada na fiabilidade aplicada a ativos físicos industriais* [Dissertação de mestrado]. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. <http://hdl.handle.net/10400.21/14488>.
- Jhonata Teles. (2017). *Curva PF: O que é e como usar*. Engeteles. <https://engeteles.com.br/curva-pf/>. Acedido em 30/09/2023
- Johnston, R. (2008). Internal service - Barriers, flows and assessment. *International Journal of Service Industry Management*, 19(2), 210–231. <https://doi.org/10.1108/09564230810869748>
- Kirzner, I. M. (1973). *Competition and Entrepreneurship*. The University of Chicago Press.
- Lee, J. H., Chan, S., & Jang, J. S. (2010). Process-oriented development of failure reporting, analysis, and corrective action system. *International Journal of Quality, Statistics, and Reliability*. <https://doi.org/10.1155/2010/213690>
- Leite A. M, & Pereira, F. D. (2003). Subcontratação em Manutenção. *1.o Encontro Luso-Brasileiro de Manutenção*.
- Loll, V. (2008). Optimizing the number of failure modes for design analysis based on physics of failure. *2008 Annual Reliability and Maintainability Symposium, IEEE*.
- Machado, V. F. F. (2014). *Análise da fiabilidade, manutenção e inspeção baseada no risco de válvulas de segurança e alívio de pressão* [Dissertação de mestrado]. Instituto Superior Técnico. https://scholar.tecnico.ulisboa.pt/records/Ufek7548V-gsM8xo_mD4Soqq-rM7ZIWGOYTV
- Maleye, J. (2006). Exploration of internal service systems using lean principles. *Management Decision*, 44(5), 674–689. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/00251740610668914/full/html>
- Metrolinx. (2020). *Metrolinx FRACAS (Failure Reporting, Analysis, and Corrective Action System) Process*.
- Mirshawka, V., & Olmedo, N. L. (1993). *Manutenção - combate aos custos da não eficácia: a vez do Brasil*. Makron Books.
- Mobley, R. K. (2004). *Maintenance Fundamentals* (2nd ed.). Elsevier Butterworth–Heinemann.

- MODUK. (2013). *DEF STAN 00-40: PART 1 - Reliability and Maintainability Part 1: Management Responsibilities and Requirements for Programmes and Plans* (7th ed.). British Defense Standards.
- Monchy, F. (2003). *Maintenance : Méthodes et organisations* (2nd ed.). Dunod.
- Moubray, J. (1999). *Reliability-Centred Maintenance* (2nd ed.). Elsevier.
- Mouta, C. S. P. (2011). *Gestão da manutenção* [Dissertação de mestrado]. Universidade da Beira Interior. <http://hdl.handle.net/10400.6/3810>
- Murty, A. S. R., & Naikan, V. N. A. (1995). Availability and Maintenance Cost Optimization of a production plant. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 12(2), 28–35.
- National Aeronautics and Space Administration. (2008). *RCM Guide Reliability-Centered Maintenance Guide For Facilities and Collateral Equipment*. CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Neves, A. (2012). *Uso de indicadores chave de desempenho para avaliar sistemas de gestão* [Dissertação de mestrado]. Instituto Superior de Educação e Ciências de Lisboa. <http://hdl.handle.net/10400.26/8978>
- Nina, J. L. G. (2016). *Melhoria da Gestão da Manutenção* [Dissertação de mestrado]. Instituto Superior de Engenharia do Porto. <http://hdl.handle.net/10400.22/10995>
- Nowlan, F. S., & Heap, H. F. (1978). *Reliability-Centered Maintenance*. National Technical Information Service .
- Panchangam, S. P., & Naikan, V. N. A. (2012). Failure Analysis Methods for Reliability Improvement of Electronic Sensors. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 1(3), 1–5.
- Pereira, F. D. (1996). *Modelos de Fiabilidade em Equipamentos Mecânicos* [Dissertação de mestrado]. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. <https://hdl.handle.net/10216/11567>
- Pinto, J. P. (2013). *Manutenção LEAN*. Lidel.
- Placca, G. C. (2017). *Análise da fiabilidade e melhoria do processo de fabrico: Estudo de caso em uma fábrica de componentes para automóveis* [Dissertação de mestrado]. Instituto Superior de Engenharia do Porto. <http://hdl.handle.net/10400.22/10497>
- Prahalad, C. K., & Hamel, G. (1990). The Core Competence of the Corporation. *Harvard Business Review*, 68(63), 79–91.
- Rothery, B., & Robertson, I. (2003). *The Truth about Outsourcing*. Gower Publishing Ltd.

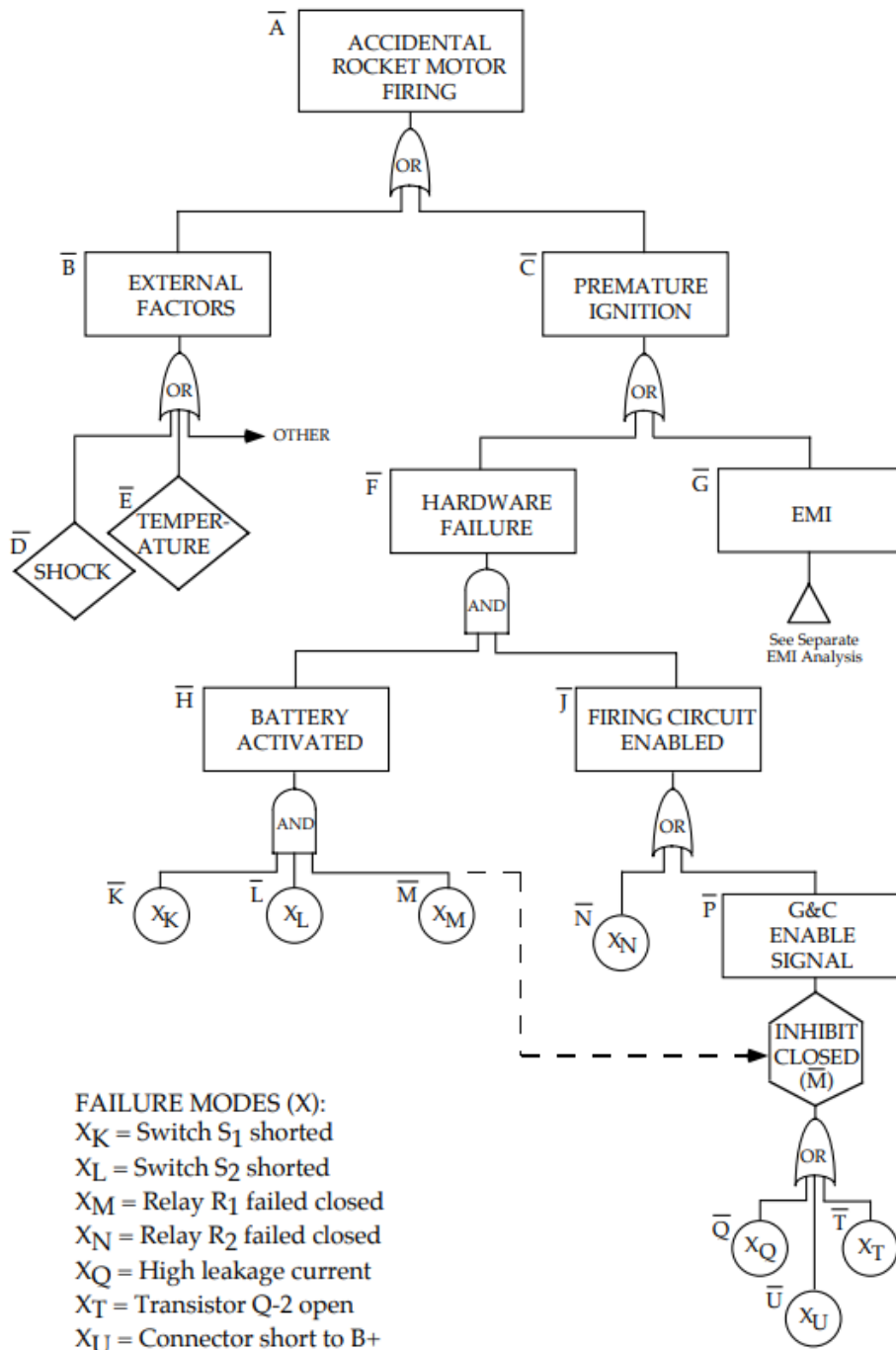
- Roy, K. R. (1998). Taking the Guesswork out of the Plant. *Chemical Engineering*, 105(1), 68–75.
- Rydzewski, J. (2000). *Stupid Things We Do to Mess up Maintainability*.
- SAE. (2009). *JA1011 - Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes*. Society of Automotive Engineers.
- Santos, A. J. R. (1998). *Outsourcing e Flexibilidade – Uma Ferramenta de Gestão para o Século XXI*. Texto Editora.
- Sapp, D. (2016). *Predictive Testing & Inspection (PTSI) To Prevent Operational Interruptions*. Plexus Scientific Corporation. <https://www.wbdg.org/resources/predictive-testing-inspection-ptsi-prevent-operational-interruptions>. Acedido em 15/05/2023
- Sena, F. M. V. (2001). *Modelo funcional de gestão da manutenção baseado na fiabilidade* [Dissertação de doutoramento]. Universidade Aberta. <http://hdl.handle.net/10400.2/2457>
- Serrano, E. J. M. (2009). *Conceito, classificação e quantificação da fiabilidade humana na relação homem-máquina* [Dissertação de mestrado]. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. <http://hdl.handle.net/10400.21/434>
- Sifonte, J. R., & Reyes-Picknell, J. V. (2017). *Reliability Centered Maintenance – Reengineered Practical Optimization of the RCM Process with RCM-R* (1st ed.). Productivity Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781315207179>
- Silva, J. L. H. da. (2016). *Análise de falhas em elementos mecânicos: aplicação de métodos fiabilísticos* [Dissertação de doutoramento]. Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/84161/2/136688>
- Smith, A. M., & Hinchcliffe, G. R. (2003). *RCM-Gateway to World Class Maintenance*. Elsevier Science.
- Sobral, J. A. da S. (2010). *Utilização da metodologia “RAMS” na análise de barreiras de segurança de instalações industriais de risco elevado* [Dissertação de mestrado]. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. <http://hdl.handle.net/10216/61440>
- Stevenson, W. (2002). *Operations Management (Operations and Decision Sciences)* (11th ed.). McGraw-Hill/Irwin.

- Susanto, T., Djamaris, R. A., Novianti, M. D., Ayumi, F., & Saomi, F. A. (2017). Evaluation of Downtime in Milling System with Approach to Failure Reporting Analysis and Corrective Action System. *International Journal of Engineering & Technology* *IJET-IJENS*, 17(1).
<https://www.researchgate.net/publication/314154332>
- Takahashi, Y., & Osada, T. (1993). *TPM / MTP - Manutenção Produtiva Total*. IMAM.
- Villacourt, M. (1992). *Failure Reporting, Analysis And Corrective Action System In The US Semiconductor Manufacturing Equipment Industry: A Continuous Improvement Process*. Thirteenth IEEE/CHMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium in IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEMT.1992.639872>
- Villacourt, M., & Govil, P. (1993). *Failure Reporting, Analysis, and Corrective Action System*. Sematech.
- Whaling, K. M., & Kemp, D. C. (2004). Driving the feedback loop reliability and safety in the full life cycle. *Annual Symposium Reliability and Maintainability, 2004 - RAMS*. <https://doi.org/10.1109/RAMS.2004.1285424>


Anexo A

|  Failure Modes & Effects Worksheet | | | | | | |
|--|---|--|---------------------------|--|-------------|------------------|
| Area: Center, Building System: Name FMEA Number: If Used Team Members: FMEA Preparers | | Date Started: Date Completed: | | Page: ___ of ___ Printed: Date/Time | | |
| Control Number | Name & Function/ Performance Requirement | Potential Failure Mode | Potential Failure Effects | Criticality | Probability | Remarks/Continue |
| | | | | | | |

Anexo B



Anexo C

| SOP 1/2023 Identificação da falha | |
|---|---|
|  | NOME DA ORGANIZAÇÃO + LOGOTIPO ORGANIZACIONAL |
| TÍTULO: Identificação da falha | DEPARTAMENTO/SEÇÃO/TÓPICO: Manutenção |
| NÚMERO: 01/2023 | DATA DE EMISSÃO: 04/06/2023 |
| | DATA DE REVISÃO: NIL |
| PREPARADA POR: | APROVADA POR: |
| _____ (Nome e função) | _____ (Nome e função) |
| 1.0 RESUMO | |
| | |
| 2.0 FINALIDADE | |
| | |
| 3.0 ÂMBITO | |
| | |
| 4.0 DEFENIÇÕES | |
| | |
| 5.0 PROCEDIMENTOS | |
| | |