

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO**

MESTRADO EM ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

**isep**



# FMEA MELHORIA DA FIABILIDADE DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO DE EMBALAGENS

**HUGO FILIPE DE OLIVEIRA CRUZ**

Setembro de 2023

FMEA – MELHORIA DA FIABILIDADE DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO DE  
EMBALAGENS

Hugo Filipe de Oliveira Cruz

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial



Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de  
Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: Hugo Filipe de Oliveira Cruz, Nº 1980186, 1980186@isep.ipp.pt

Orientação científica: Fernando Maurício T. Sousa Dias, fmd@isep.ipp.pt

Empresa: DS Smith Packaging Portugal, S.A.

Supervisão: Francisco Augusto Laranjeira Barroco, francisco.barroco@dssmith.com



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial

**2023**



“If you do it right the first time, you are invisible. You satisfied the requirements.  
That is your job. Mess it up, and correct it later, you become a hero.”

Dr. W. Edwards Deming



## *Agradecimentos*

Em primeiro lugar agradeço à minha família pelo apoio incondicional, mesmo com a penalização da minha ausência. Pelo total apoio e pela espera ao longo destes 2 anos registro a minha maior admiração e reconhecimento.

Ao Professor Doutor Maurício Dias, manifesto toda a minha gratidão pela orientação deste trabalho, pelos conselhos e pela total disponibilidade sempre que foi necessário.

Agradeço também ao corpo docente do DEE, por ao longo destes 2 anos terem contribuído para o meu desenvolvimento pessoal, profissional e terem criado em mim as melhores competências para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Engenheiro Francisco Barroco, Diretor de Operações da DS Smith, pelo apoio em todo o trajeto do mestrado e pela disponibilidade imediata para me acolher na realização deste trabalho.

À equipa de manutenção da DS Smith que ao longo deste percurso me suportaram de forma indireta, pelo esforço em colmatar a minha ausência em momentos em que a minha presença era necessária, a eles o meu agradecimento e a convicção de que também deram um passo no seu crescimento.

Por último, mas com a mesma relevância, ao Engenheiro Mauro Melo, Coordenador de Engenharia de Produção e Processo da Faurecia, por todo o companheirismo e disponibilidade para transmitir as melhores boas práticas sobre o tema do trabalho na atualidade da indústria automóvel.



## *Resumo*

Sendo a fiabilidade dos sistemas uma condição obrigatória nas empresas que pretendem acompanhar a competitividade do mercado, a utilização da ferramenta Failure Mode and Effect Analysis/ Failure Mode and Effect Critical Analysis (FMEA/FMECA) introduz uma grande vantagem na análise e antecipação de falhas nos produtos, processos e equipamentos, estando a sua eficácia demonstrada nas indústrias de topo tais como aeroespacial, aeronáutica, automóvel e militar.

Com este trabalho pretende-se numa primeira fase efetuar uma revisão da literatura para entender o atual estado da arte e posteriormente a introdução desta ferramenta na indústria do cartão e das embalagens de cartão, mais precisamente numa linha de produção de caixas. A análise será feita ao equipamento Emba, aplicando a metodologia FMEA.

O objetivo será reduzir as paragens, através da identificação dos modos de falha de cada função, a identificação das possíveis causas e a implementação de ações que permitam baixar ou eliminar o risco de falha.

## *Palavras-Chave*

Fiabilidade, FMEA, FMECA, AIAG, VDA, SAE, MIL-STD-1629A, DFMEA, PFMEA, FMEA-MSR.



## *Abstract*

Since the system reliability is a mandatory condition for companies that intend to keep up with market competitiveness, the use of the Failure Mode and Effect Analysis/ Failure Mode and Effect Critical Analysis (FMEA/FMECA) tool introduces a great advantage in the analysis and anticipation of failures in products, processes and equipment, with its effectiveness demonstrated in top industries such as aerospace, aeronautics, automotive and military.

This work intends, in a first phase, to carry out a literature review to understand the current state of the art and subsequently the introduction of this tool in the cardboard and cardboard packaging industry, more precisely in a box production line. The analysis will be performed on the Emba equipment, applying the FMEA methodology.

The aim will be to reduce stoppages by identifying the failure modes of each function, identifying possible causes and implementing actions to lower or eliminate the risk of failure.

## *Keywords*

Reliability, FMEA, FMECA, AIAG, VDA, SAE, MIL-STD-1629<sup>a</sup>, DFMEA, PFMEA, FMEA-MSR.



## *Résumé*

Étant donné que la fiabilité des systèmes est une condition obligatoire pour les entreprises qui entendent rester compétitives sur le marché, l'utilisation de l'outil d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets/analyse critique des modes de défaillance et de leurs effets (FMEA/FMECA) présente un grand avantage dans l'analyse et l'anticipation des défaillances des produits, procédés et équipements, dont l'efficacité a été démontrée dans des industries de pointe telles que l'aérospatiale, l'aéronautique, l'automobile et le militaire.

Ce travail se propose, dans un premier temps, de réaliser une revue de la littérature pour comprendre l'état de l'art actuel et par la suite l'introduction de cet outil dans l'industrie du cartonnage et de l'emballage en carton, plus précisément dans une chaîne de production de boîtes. L'analyse sera effectuée sur l'équipement Emba, en appliquant la méthodologie FMEA.

L'objectif sera de réduire les arrêts, à travers l'identification des modes de défaillance de chaque fonction, l'identification des causes possibles et la mise en place d'actions permettant de diminuer ou d'éliminer le risque de défaillance.

## *Mots-clés*

Fiabilité, FMEA, FMECA, AIAG, VDA, SAE, MIL-STD-1629<sup>a</sup>, DFMEA, PFMEA, FMEA-MSR.



# Índice

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>III</b>
<b>PALAVRAS-CHAVE.....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>KEYWORDS .....</b>	<b>V</b>
<b>RESUME .....</b>	<b>VII</b>
<b>MOTS-CLES .....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>	<b>XV</b>
<b>SIGLAS E ACRÓNIMOS.....</b>	<b>XVII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.3 CALENDARIZAÇÃO .....	4
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	5
<b>2. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA .....</b>	<b>7</b>
2.1. RECOLHA DE DADOS .....	8
2.2. TIPO DE DOCUMENTOS.....	9
2.3. ANO DE PUBLICAÇÃO .....	9
2.4. ÁREA TEMÁTICA.....	10
2.5. PAÍS DE PUBLICAÇÃO.....	10
2.6. IDIOMA .....	11
2.7. ÁREAS DE INTERESSE .....	11
2.8. AUTORES MAIS RELEVANTES .....	12
2.9. REVISTAS MAIS RELEVANTES .....	14
2.10. DOCUMENTOS MAIS RELEVANTES .....	16
2.11. NORMAS E MANUAIS DE REFERÊNCIA .....	20
2.12. MANUAL DE REFERÊNCIA MAIS RELEVANTE .....	20

<b>3. ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>23</b>
3.1DEFINIÇÃO DE FMEA/FMECA.....	23
3.2CRÍTICAS À METODOLOGIA FMEA/FMECA .....	25
3.3VARIANTES PROPOSTAS AO FMEA/FMECA.....	27
3.3.1 <i>Large Group (LGFMEA)</i> .....	27
3.3.2 <i>ELECTRE TRI</i> .....	27
3.3.3 <i>PROMETHEE (Preference ranking organization method for enrichment evaluation)</i> .....	28
3.3.4 <i>Variable Precision Rough Set Theory and TODIM (Tomada de Decisão Interativa e Multicritério) Method</i> .....	28
3.3.5 <i>Dempster-Shafer Theory (DST)</i> .....	28
3.3.6 <i>Fuzzy evidential reasoning and fuzzy Petri nets</i> .....	29
3.3.7 <i>Evidential reasoning (ER)</i> .....	29
3.3.8 <i>Fuzzy</i> .....	30
3.3.9 <i>Consensus and opinion evolution-based FMEA approach for reliability management in social network and uncertainty contexts</i> .....	30
3.4MANUAL DE REFERÊNCIA FMEA [13] .....	31
3.4.1 <i>Propósito e descrição</i> .....	31
3.4.2 <i>Objetivos e limites do FMEA</i> .....	31
3.4.3 <i>Integração do FMEA na empresa</i> .....	33
3.4.4 <i>Potenciais considerações do FMEA</i> .....	33
3.4.5 <i>Design FMEA</i> .....	34
3.4.6 <i>Process FMEA</i> .....	35
3.4.7 <i>Supplemental FMEA for Monitoring and System Response (FMEA-MSR)</i> .....	35
3.4.8 <i>Nova classificação Ation Priority (AP)</i> .....	38
<b>4. IMPLEMENTAÇÃO DO FMEA EM EQUIPAMENTO INDUSTRIAL .....</b>	<b>43</b>
4.1CARACTERIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO OBJETO DE ESTUDO E DA SUA ENVOLVENTE .....	43
4.1.1 <i>Caracterização da Empresa</i> .....	43
4.1.2 <i>Caracterização da linha</i> .....	45
4.1.3 <i>Caracterização do Equipamento</i> .....	46
4.1.4 <i>Caracterização do processo</i> .....	46
4.1.5 <i>Caracterização do departamento de manutenção</i> .....	50
4.1.6 <i>Caracterização da iteração entre produção-manutenção</i> .....	51
4.2LEVANTAMENTO DE DADOS E INDICADORES DO EQUIPAMENTO .....	54
4.2.1 <i>Indicadores resultantes da aplicação PC-Topp</i> .....	55
4.2.2 <i>Indicadores resultantes das participações de avaria</i> .....	56
4.3CONSTRUÇÃO DO DOCUMENTO FMEA.....	57

4.3.1	<i>Pré-Requisitos</i> .....	57
4.3.2	<i>Descrição do Fmea</i> .....	58
4.3.3	<i>Instruções de preenchimento</i> .....	61
4.3.4	<i>Tabelas de severidade, ocorrência, detecção e ap</i> .....	61
4.3.5	<i>Revisões</i> .....	64
4.3.6	<i>Presenças</i> .....	64
4.3.7	<i>Fluxograma do processo</i> .....	65
4.3.8	<i>Elaboração do FMEA</i> .....	65
4.3.9	<i>Resultados do FMEA</i> .....	67
4.3.10	<i>Análise de Resultados do FMEA</i> .....	68
4.3.11	<i>Definição do objetivo de intervenção</i> .....	68
4.3.12	<i>Seguimento do RPN e ações</i> .....	70
4.4	<b>LEVANTAMENTO DE INDICADORES APÓS A IMPLEMENTAÇÃO</b> .....	72
4.4.1	<i>Indicadores resultantes da aplicação PC-Topp</i> .....	72
4.4.2	<i>Indicadores resultantes das participações de avaria</i> .....	72
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>75</b>
5.1	<b>RESULTADO DO FMEA</b> .....	75
5.2	<b>IMPLEMENTAÇÃO DO TRABALHO</b> .....	76
5.3	<b>TRABALHOS FUTUROS</b> .....	77
	<b>REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS</b> .....	<b>79</b>



## *Índice de Figuras*

Figura 1 - Planeamento do trabalho	5
Figura 2 - Resultados do termo de pesquisa FMEA	8
Figura 3 - Resultados do termo de pesquisa FMECA	8
Figura 4 - Resultados do termo de pesquisa FMEA e FMECA	8
Figura 5 - Publicações por ano	9
Figura 6 - Áreas de publicação	10
Figura 7 - Palavras chave	12
Figura 8 - Autores mais relevantes	12
Figura 9 - Revistas mais relevantes	14
Figura 10 - Documentos mais relevantes	17
Figura 11 - Apresentação do FMEA Handbook	21
Figura 12 - DS Smith Packaging – Esmoriz [14]	45
Figura 13 - Máquina Emba	46
Figura 14 - Fluxograma do processo	47
Figura 15 - Rolo Anilox	48
Figura 16 - Textura do Rolo Anilox	49
Figura 17 - Organigrama da manutenção	50
Figura 18 - PC-Topp - Fila de encomendas	51

Figura 19 - PC-Topp - Desenho de caixa 1	51
Figura 20 – PC-Topp - Desenho de caixa 2	52
Figura 21 - PC-Topp - Estado dos equipamentos	52
Figura 22 - Participação de avaria	53
Figura 23 - DimoMaint	54
Figura 24 - Classificação dos períodos de tempo	54
Figura 25 - Lista de Equipamentos - Linha Emba	55
Figura 26 - Indicadores PC-Topp – Linha Emba	56
Figura 27 - Indicadores Participações de Avaria - Linha Emba	56
Figura 28 - Indicadores Participações de Avaria - Máquina Emba	56
Figura 29 – FMEA – Capa	58
Figura 30 - FMEA - Descrição	60
Figura 31 - FMEA – Revisões	64
Figura 32 - FMEA - Presenças	64
Figura 33 - Cabeçalho identificativo do equipamento	66
Figura 34 - Especificação para a curvatura máxima do cartão	71
Figura 35 - Indicadores PC-Topp linha Emba	73
Figura 36 - Indicadores das participações de avaria da linha Emba	73
Figura 37 - Indicadores das participações de avaria da máquina Emba	73

## *Índice de Tabelas*

Tabela 1 - Publicações de cada tipo	9
Tabela 2 - Publicações por país	11
Tabela 3 - Publicações por idioma	11
Tabela 4 - Classificação dos autores	13
Tabela 5 - Classificação das revistas	15
Tabela 6 – Artigos de revistas e autores relevantes	18
Tabela 7 - Listagem final de artigos	19
Tabela 8 - Action Priority (AP) [13]	39
Tabela 9 - Action Priority (AP) – Continuação [13]	40
Tabela 10 – FMEA - Instruções	61
Tabela 11 – FMEA - Severidade	62
Tabela 12 – FMEA - Ocorrência	62
Tabela 13 – FMEA - Detecção	62
Tabela 14 – FMEA - AP	63
Tabela 15 - FMEA com RPN e AP	66
Tabela 16 - Nº de causas/RPN	67
Tabela 17 - Nº de causas/RPN quando $S \geq 9$	67
Tabela 18 - Nº de causas/AP	67

Tabela 19 - FMEA com ações	69
Tabela 20 - FMEA com ações implementadas	69
Tabela 21 - Seguimento RPN (Nº Causas/RPN)	70
Tabela 22 – Seguimento RPN (Nº Causas/RPN com $S \geq 9$ )	70
Tabela 23 - Seguimento RPN (Ações fechadas)	71

## *Siglas e Acrónimos*

AIAG	–	Automotive Industry Action Group
AP	–	Action Priority
Downtime	–	Tempo de paragem
DST	–	Dempster-Shafer Theory
DTC	–	Diagnostic Trouble Code
ER	–	evidential reasoning
FER	–	Fuzzy evidential reasoning
FMEA	–	Failure Mode and Effect Analysis
FMEA-MSR	–	FMEA for Monitoring and System Response
FMECA	–	Failure Mode and Effect Critical Analysis
FMEDA	–	Failure mode, effects, and diagnostic analyses
FPN	–	Fuzzy Petri nets
FRPN	–	Fuzzy RPN
FTA	–	fault tree analyses
IEC	–	International Electrotechnical Commission
LGFMEA	–	Large group FMEA
MRA	–	Minimax regret approach
MTBF	–	Mean Time Between Failures

MTTR	– Mean Time to Repair
NASA	– National Aeronautics and Space Administration
OEM	– Original Equipment Manufacturers
OWA	– Ordered weighted averaging
PROMETHEE	– Preference ranking organization method for enrichment evaluation
RPN	– Risk Priority Number
SAE	– Society of Automotive Engineers
TIER 1	– Fornece diretamente o OEM
TODIM	– Tomada de Decisão Interativa e Multicritério
TOPSIS	– Technique for order preference similar to ideal solution
VDA	– Verband der Automobilindustrie
WoS	– Web of Science

# 1. INTRODUÇÃO

A fiabilidade de sistemas é uma necessidade cada vez mais notória no atual tecido empresarial, em que a competitividade e exigências de mercado criam constantes desafios nos diversos departamentos de uma empresa, que devem ser não apenas ultrapassados, mas também antecipados.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A ferramenta Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) com a sua extensão Failure Mode and Effect Critical Analysis (FMECA), permite estudar todos os possíveis modos de falha, as suas causas e os seus efeitos, atribuindo-lhes uma classificação baseada em critérios de

severidade, ocorrência e detecção, o que possibilita a definição de ações que eliminem as causas com maior classificação *Risk Priority Number* (RPN).

O FMECA foi originalmente desenvolvido na década de 40 pelos militares dos EUA, que publicaram a MIL-P-1629 em 1949. No início da década de 1960, as empresas subcontratadas pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) utilizavam variações do FMECA com uma diversidade de nomes. Em 1966, a NASA lançou o seu próprio procedimento FMECA, o RA-006-013-1A (ver anexo A) para o uso no programa Apollo. De acordo com o Preferred Reliability Practice PD-AP-1307 (ver anexo B) o FMECA foi posteriormente usado em outros programas da NASA, incluindo o Viking, o Voyager, o Magellan e o Galileo. Em 1974 a MIL-P-1629 foi substituído pela MIL-STD-1629 (SHIPS) e possivelmente devido a isto, o desenvolvimento do FMECA é por vezes incorretamente atribuído à NASA. Em simultâneo com o desenvolvimento do programa espacial, o uso do FMEA e do FMECA passa também a abranger a aviação civil.

Em 1967, a Society of Automotive Engineers (SAE) lança a primeira publicação civil a abordar a FMECA a ARP926 (ver anexo G). A indústria da aviação civil hoje em dia em vez do FMECA tende a usar uma combinação de FMEA e Análise de Árvore de Falhas de acordo com o SAE ARP4761, embora alguns fabricantes de helicópteros continuem a usar o FMECA para helicópteros civis (ver anexo I).

Já na indústria automóvel, a Ford Motor Company começou a usar o FMEA na década de 70 após ter problemas com seu modelo Pinto, e na década de 80 o FMEA ganhava uma ampla utilização.

Em 1980, a MIL-STD-1629 e o padrão aeronáutico FMECA de 1977 MIL-STD-2070 foram substituídos pela MIL-STD-1629A (ver anexo C).

Em 1985, na Europa, a International Electrotechnical Commission (IEC) publicou a IEC-812 (agora IEC-60812), abordando tanto o FMEA como o FMECA para uso geral. (ver anexo F).

Em 1993, a Automotive Industry Action Group (AIAG) lança o manual de referência do FMEA para utilização da Chrysler LLC, da Ford Motor Company e da General Motor Corporation, este manual está alinhado com o standard da Society of Automotive Engineers (SAE) SAE J1739, também da mesma época (ver anexo D).

Em 1995, a AIAG lança a 2ª edição do seu manual de referência do FMEA (ver anexo D).

Em 1996, a Verband der Automobilindustrie (VDA) lança também o seu manual de FMEA, para utilização de fabricantes e fornecedores da indústria automóvel, tais como a BMW AG, a Robert Bosch GmbH, a Fichtel & Sachs AG, a Mercedes-Benz AG, a Mercedes-Benz Omnibusse, EvoBus GmbH, a Dr.-Ing. h.c. F Porsche AG, a Volkswagen AG e a WABCO Fahrzeugbremsen GmbH (ver anexo H).

Em 1998 a MIL-STD-1629A foi cancelada sem substituição, no entanto, ainda hoje permanece com ampla utilização nas aplicações militares e espaciais.

Em 2000, a SAE realiza uma revisão da sua norma SAE J1739 [1] .

Em 2001, a AIAG lança a 3ª edição do seu manual de referência do FMEA (ver anexo D).

Em 2002, a SAE realiza uma nova revisão da sua norma SAE J1739 [1].

Em 2008, a AIAG lança a 4ª edição do manual de referência do FMEA (ver anexo D).

Em 2009, a SAE realiza uma nova revisão da sua norma SAE J1739 [1].

Em 2019, a AIAG lança o FMEA *Handbook*, um novo manual que engloba o seu próprio manual, a SAE J1739 e o manual VDA (ver anexo E).

Em 2021, a SAE realiza uma nova revisão da sua norma SAE J1739 [1].

Hoje em dia o FMEA/FMECA é amplamente utilizado em diversas indústrias, como por exemplo nas indústrias automóvel, aeronáutica, aeroespacial e militar, sendo até obrigatório em algumas delas, como é o caso da indústria automóvel, podendo em alguns casos sofrer pequenas melhorias em relação ao seu formato original.

Existem ainda assim muitas indústrias onde esta ferramenta não é utilizada, exemplo disso são as indústrias do cartão e das embalagens de cartão, pelo que a sua introdução é uma oportunidade de melhoria significativa.

## 1.2 OBJETIVOS

Com este trabalho pretende-se introduzir a ferramenta FMEA/FMECA na empresa DS Smith – Packaging Portugal, unidade de Esmoriz, na linha de produção de caixas Emba, sendo a análise feita ao equipamento, que é composto por um introdutor, 4 impressores, um slotter, um troquelador, um aplicador de cola, um dobrador e um empacotador.

Previamente será feita uma revisão da literatura e do estado da arte da aplicação da ferramenta, tanto ao nível académico como também industrial.

O objetivo final será reduzir as paragens, através da identificação dos modos de falha de cada função, a identificação das possíveis causas e os efeitos provocados, implementando ações que permitam baixar ou eliminar o risco de falha.

## 1.3 CALENDARIZAÇÃO

As diversas etapas deste trabalho obedecem de uma forma geral ao planeamento realizado no diagrama de *gantt* da Figura 1.



ferramenta neste, e em futuros, trabalhos na empresa. É também feita a caracterização do equipamento objeto da implementação e toda a sua envolvente, desde a empresa até ao processo, passando pelas equipas de manutenção e produção. É ainda realizado um levantamento do histórico de paragens utilizando os indicadores Downtime, MTTR e MTBF. Para além disso, é explicado em detalhe o preenchimento da matriz FMEA previamente criada, sendo obtidos e analisados os resultados, implementadas ações, feitas revisões ao valor de RPN e AP e, por último, uma verificação dos indicadores atuais.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões da implementação da ferramenta, e deste projeto. São ainda apresentados trabalhos futuros.

## 2. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

No presente capítulo é apresentada a recolha de dados efetuada e a análise Bibliométrica relativa ao tema FMEA/FMECA, tendo sido utilizada a base de dados *Web of Science* (WoS) para efetuar a pesquisa.

Foi ainda efetuada uma pesquisa por normas e manuais do FMEA/FMECA que servem de referência às indústrias militar, aeroespacial e automóvel.

## 2.1. RECOLHA DE DADOS

A pesquisa foi realizada no dia 18 de março de 2023, tendo sido utilizado inicialmente o termo de pesquisa “FMEA”, selecionando todos os campos de pesquisa (*Topic, Title, Publication Title*), da qual resultaram 3803 documentos (Figura 2).

Numa segunda fase foi aplicado o termo de pesquisa “FMECA”, selecionando igualmente todos os campos de pesquisa (*Topic, Title, Publication Title*), da qual resultaram 864 documentos (Figura 3).

Por último, de forma a englobar as 2 metodologias, foram aplicados ambos os termos de pesquisa, “FMEA e FMECA” e aplicando a função lógica “AND” disponível no site. Como mostra a Figura 4 foi obtido o *dataset* final de 160 documentos que referem ambas as metodologias.

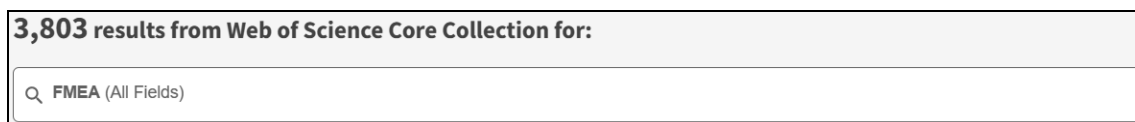


Figura 2 - Resultados do termo de pesquisa FMEA



Figura 3 - Resultados do termo de pesquisa FMECA

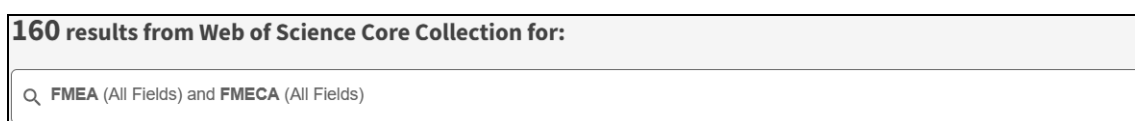


Figura 4 - Resultados do termo de pesquisa FMEA e FMECA

## 2.2. TIPO DE DOCUMENTOS

Analisando os tipos de documentos, verifica-se que os tipos "Proceeding Paper" e "Article" se destacam com 48% e 47% respectivamente, representando 95% do total de documentos. A Tabela 1 mostra em detalhe os resultados.

Tabela 1 - Publicações de cada tipo

Tipo de documento	Nº. Publicações
Proceeding Paper	83
Article	80
Review Article	7
Early Access	1
Meeting Abstract	1

## 2.3. ANO DE PUBLICAÇÃO

A primeira publicação indexada no WoS é de 1990, sendo possível observar no gráfico da Figura 5 a evolução do número de publicações com uma tendência positiva, sendo mais acentuada a partir de 2004. Mesmo com uma quebra entre 2007 e 2009, a tendência é recuperada.

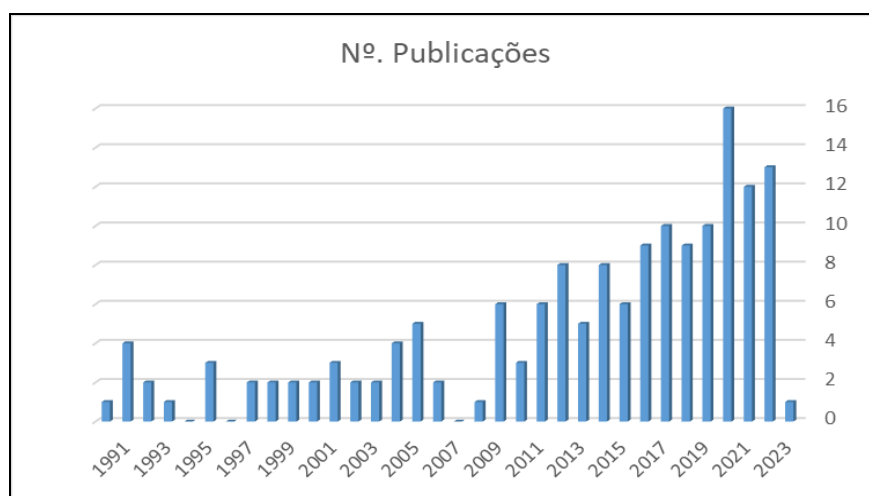


Figura 5 - Publicações por ano

## 2.4. ÁREA TEMÁTICA

O Gráfico da Figura 6 representa as 10 principais áreas de publicação sendo possível verificar que as 3 áreas com maior número de publicações são de engenharia: “*Engineering Electrical Electronic*”, “*Engineering Multidisciplinary*” e “*Engineering Industrial*”, correspondendo a mais de 50% dos artigos indexados. É também importante referir que alguns artigos foram classificados em mais do que uma área.



Figura 6 - Áreas de publicação

## 2.5. PAÍS DE PUBLICAÇÃO

Relativamente à contribuição de publicações científicas de cada país, na Tabela 2 temos os 10 países com mais documentos publicados, sendo a lista liderada pelo Estados Unidos da América. Portugal encontra-se na 30ª posição com 1 publicação.

Tabela 2 - Publicações por país

País	Nº. Publicações	%
USA	37	23.1
PEOPLES R CHINA	27	16.9
ITALY	21	13.1
INDIA	14	8.8
ENGLAND	7	4.4
SPAIN	5	3.1
CZECH REPUBLIC	4	2.5
FRANCE	4	2.5
GERMANY	4	2.5
ALGERIA	3	1.9

## 2.6. IDIOMA

Relativamente ao idioma, como seria de esperar e mostrado na Tabela 3, a língua inglesa tem o domínio, com mais de 98% das publicações. É importante referir que existe 1 artigo escrito em português.

Tabela 3 - Publicações por idioma

Idioma	Nº. Publicações	%
English	157	98.1
French	1	0.6
Korean	1	0.6
Portuguese	1	0.6

## 2.7. ÁREAS DE INTERESSE

A partir deste subcapítulo o resultado obtido na base de dados do *Web of Science* foi exportado e importado no software VOSviewer, o qual permite diversas análises aplicando filtros e combinações de forma a obter os documentos mais relevantes.

Relativamente às áreas de interesse, de 627 palavras chave encontradas nos 160 documentos, foram selecionadas aquelas que são utilizadas pelo menos 5 vezes, tendo sido obtido um resultado de 30 palavras chave, como mostra a Figura 7.



Após a obtenção dos 35 autores, numa segunda fase, foi feita a classificação dos autores de acordo com o produtório de 3 critérios, o número de artigos na amostra, o H-Index e o número total de citações do autor. O produtório permite evidenciar qualquer pequena diferença num dos critérios. Na Tabela 4 podemos ver o resultado obtido.

Tabela 4 - Classificação dos autores

Autor	NºArtigos Amostra	H-Index	nº publicações	Nº citações	Produtório
fang, hong	2	76	1101	29512	4485824
herrera-viedma, enrique	1	91	464	31309	2849119
xiao, jing	1	79	2372	33651	2658429
liu, hu-chen	2	53	154	7901	837506
dong, yucheng	1	63	211	11261	709443
zuo, ming j.	1	55	298	11161	613855
chin, kwai-sang	2	43	162	5889	506454
wang, ying-ming	1	50	237	8603	430150
yang, jian-bo	1	47	244	8012	376564
song, wenyan	2	30	162	2922	175320
ji, ping	1	30	211	3680	110400
zhang, hengjie	1	29	79	3464	100456
tsung, fugee	1	31	134	2913	90303
shafiee, mahmood	1	29	91	2101	60929
you, xiao-yue	1	18	18	1368	24624
manuela, la fata concetta	2	10	26	515	10300
certa, antonella	1	10	31	513	5130
russo, davide	1	11	63	429	4719
li, jing	2	8	10	292	4672
mario, enea	1	10	19	467	4670
rizzi, caterina	1	11	58	416	4576
renjith, v. r.	2	7	24	225	3150
poon, gary ka kwai	1	4	4	753	3012
chiclana, francisco	1	4	13	584	2336
spreafico, christian	1	9	30	256	2304
kim, kyungmee o.	1	7	21	243	1701
animah, isaac	1	8	13	184	1472
hopps, fabrizio	1	3	3	117	351
inghilleri, roberta	1	2	2	111	222
antonella, certa	1	2	2	80	160
maria, galante giacomo	1	2	2	78	156
kalathil, manoj jose	1	2	2	54	108
kumar, p. haresh	1	1	1	42	42
madhavan, dilip	1	1	1	42	42
la fata, concetta manuela	2	0	2	0	0

Do resultado obtido destacam-se os autores Hong Fang, Enrique Herrera-Viedma e Jing Xiao tanto pelo elevado H-Index como também pelo número de publicações.

## 2.9. REVISTAS MAIS RELEVANTES

Nesta análise foram selecionadas as revistas mais relevantes das 123 presentes na amostra. Para isso foram selecionadas as que tinham pelo menos 1 documento citado 5 ou mais vezes, tendo sido obtido o resultado de 53 revistas que ao eliminar as não ligadas passou a 32 revistas como evidencia a Figura 9.

Desta primeira fase de análise podemos destacar 2 revistas, Engineering Failure Analysis e Journal of Loss Prevention in the Process Industries, pelo número de artigos na amostra.

Obtidas as 32 revistas, numa segunda fase, foi feita a sua classificação de acordo com 3 critérios, o número de citações, o Quartil e o Factor de impacto. A classificação foi calculada utilizando a Equação 1. Na Tabela 5 é possível verificar o resultado obtido.

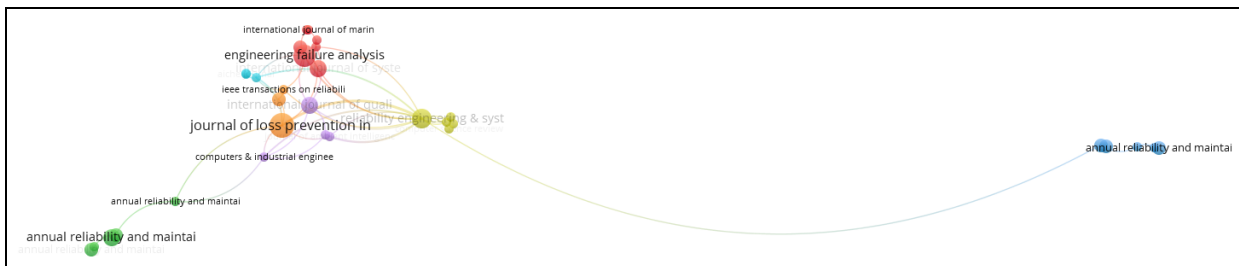


Figura 9 - Revistas mais relevantes

Equação 1 - Classificação das revistas

$$Estatística = \frac{Fator\ impacto * N^{\circ}\ Citações}{Quartil}$$

Tabela 5 - Classificação das revistas

Revistas	Artigos Amostra	Citações	Quartil	Fator Impacto 2021	Estatística
computers & industrial engineering	1	27459	1	7,18	197156
reliability engineering & system safety	4	26227	1	7,247	190067
international journal of advanced manufacturing technology	2	52453	2	3,563	93445
Energies	2	76498	3	3,252	82924
aiche jornal	1	33337	2	4,167	69458
journal of intelligent manufacturing	1	7649	1	7,136	54583
engineering failure analysis	5	14636	1	3,634	53187
ieee transactions on reliability	1	8108	1	5,883	47699
computers & operations research	1	18486	2	5,159	47685
journal of mechanical design	1	9526	1	3,441	32779
Mathematics	1	12448	1	2,592	32265
soft computing	1	17142	2	3,732	31987
journal of loss prevention in the process industries	6	10005	2	3,916	19590
computer science review	1	2170	1	8,757	19003
journal of ambient intelligence and humanized computing	1	8357	2	3,662	15302
quality and reliability engineering international	2	4678	2	3,007	7033
Kybernetes	1	2420	3	2,352	1897
quality engineering	2	1340	2	2,286	1532
international journal of automotive technology	1	2140	3	1,557	1111
2011 international conference on quality, reliability, risk,	1	401	5	0	0
annual reliability and maintainability symposium, 2003 proceedings	1	718	5	0	0
international journal of marine energy	1	2366	5	0	0
international journal of system assurance engineering and management	3	0	2	0	0

journal of industrial and production engineering	2	0	3	0	0
annual reliability and maintainability symposium - 1995 proceedings	3	0	4	0,029	0
annual reliability and maintainability symposium - 2000 proceedings	2	0	4	0,029	0
annual reliability and maintainability symposium, 2001 proceedings	2	0	4	0,029	0
annual reliability and maintainability symposium, 2002 proceedings	1	0	4	0,029	0
annual reliability and maintainability symposium, 1999 proceedings	2	0	4	0,029	0
2011 ieee international instrumentation and measurement technology	1	13116	5	0	0
2015 ieee international instrumentation and measurement technology	1	13116	5	0	0
international journal of quality & reliability management	3	0	3	0	0

Desta última análise é possível destacar as revistas “Computers & Industrial Engineering” e “reliability engineering & system safety” devido ao seu Quartil e Factor de Impacto, sendo também possível destacar as revistas “International Journal of Advanced Manufacturing Technology” e “energies” pelo número de citações que possuem.

## 2.10. DOCUMENTOS MAIS RELEVANTES

Nesta análise foram selecionados os documentos mais relevantes dos 160 presentes na amostra. Para isso foram selecionados os que tinham pelo menos 20 citações, tendo sido obtido o resultado de 27 documentos que ao eliminar os não ligados passaram a 13 como evidencia a Figura 10.

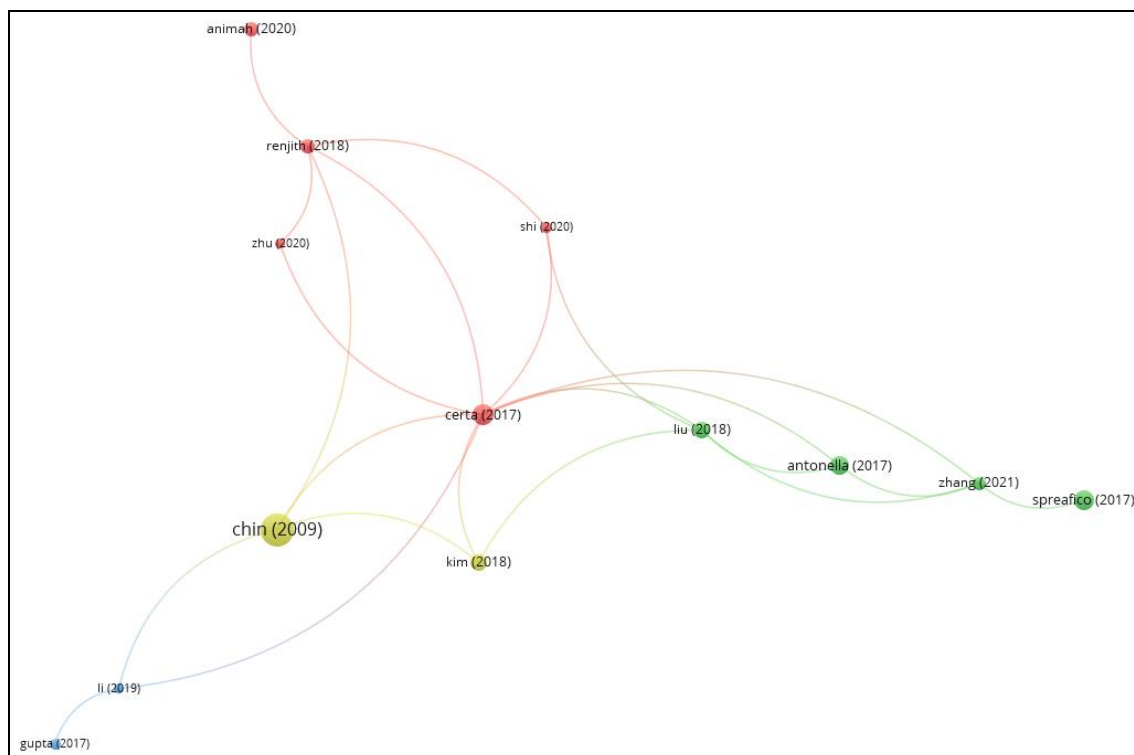


Figura 10 - Documentos mais relevantes

Nesta análise destacam-se os artigos dos autores Certa e Chin, pelo número de citações. Numa segunda fase foi verificado se os 13 artigos encontrados foram escritos pelos autores mais relevantes e se foram publicados nas revistas mais relevantes, tendo sido eliminado apenas um documento que apesar de ser proveniente de uma revista relevante, os autores não o são. A Tabela 6 mostra o resultado obtido.

Dos 12 artigos encontrados foi ainda feita uma análise relativamente à sua relevância para este trabalho, resultando na exclusão de mais um artigo onde apesar de ser feita referência à metodologia FMEA/FMECA o seu foco é na análise de risco. A lista final de artigos consta na

Tabela 7.

Tabela 6 – Artigos de revistas e autores relevantes

Documento	Revistas	Autores
Consensus and opinion evolution-based failure mode and effect analysis approach for reliability management in social network and uncertainty contexts	X	X
Failure Mode and Effects Analysis Using Variable Precision Rough Set Theory and TODIM Method	X	X
General model for the risk priority number in failure mode and effects analysis	X	X
Failure mode and effects analysis using a group-based evidential reasoning approach	X	X
An improved approach for failure mode and effect analysis involving large group of experts: An application to the healthcare field	X	X
ELECTRE TRI-based approach to the failure modes classification on the basis of risk parameters: An alternative to the risk priority number	X	X
Application of risk analysis in the liquefied natural gas (LNG) sector: An overview	X	X
A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents	X	X
A Dempster-Shafer Theory-based approach to the Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA) under epistemic uncertainty: application to the propulsion system of a fishing vessel	X	X
A novel method for failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning and fuzzy Petri nets	X	X
Failure mode and effect analysis using regret theory and PROMETHEE under linguistic neutrosophic context	X	X
Fuzzy FMECA (failure mode effect and criticality analysis) of LNG storage facility	X	X
A Failure Mode Effect and Criticality Analysis of Conventional Milling Machine Using Fuzzy Logic: Case Study of RCM	X	

Tabela 7 - Listagem final de artigos

Documento
Consensus and opinion evolution-based failure mode and effect analysis approach for reliability management in social network and uncertainty contexts
Failure Mode and Effects Analysis Using Variable Precision Rough Set Theory and TODIM Method
General model for the risk priority number in failure mode and effects analysis
Failure mode and effects analysis using a group-based evidential reasoning approach
An improved approach for failure mode and effect analysis involving large group of experts: An application to the healthcare field
ELECTRE TRI-based approach to the failure modes classification on the basis of risk parameters: An alternative to the risk priority number
A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents
A Dempster-Shafer Theory-based approach to the Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA) under epistemic uncertainty: application to the propulsion system of a fishing vessel
A novel method for failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning and fuzzy Petri nets
Failure mode and effect analysis using regret theory and PROMETHEE under linguistic neutrosophic context
Fuzzy FMECA (failure mode effect and criticality analysis) of LNG storage facility

## 2.11. NORMAS E MANUAIS DE REFERÊNCIA

Relativamente a normas e manuais de referência, foram encontrados os seguintes:

- MIL-STD-1629<sup>a</sup>
- SAE J-1739
- SAE ARP558
- POTENCIAL FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS (FMEA) Reference Manual Fourth Edition - AIAG
- VDA - Quality Management in the Automotive Industry - Quality Assurance before series production Part 2 – System FMEA - 1st Edition 1996
- Failure Mode and Effects Analysis – FMEA Handbook – Design FMEA, Process FMEA, Supplemental FMEA for Monitoring & System Response – 1<sup>st</sup> Edition 2019 – AIAG & VDA

## 2.12. MANUAL DE REFERÊNCIA MAIS RELEVANTE

Considerando que este último manual de referência engloba a SAE, a AIAG e a VDA (ver Figura 11), foi este o manual selecionado para a realização deste trabalho.

Esta publicação conjunta é o culminar de mais de 3 anos de trabalho por parte dos *Original Equipment Manufacturers* (OEMs) e dos fornecedores *Tier 1* membros do *Automotive Industry Action Group* (AIAG) e da *Verband der Automobilindustrie* (VDA), com o objetivo de fornecer uma base comum para o FMEA em todos os sectores da indústria automóvel, nas empresas que são representadas por estas organizações.

# AIAG & VDA FMEA - Project Objective

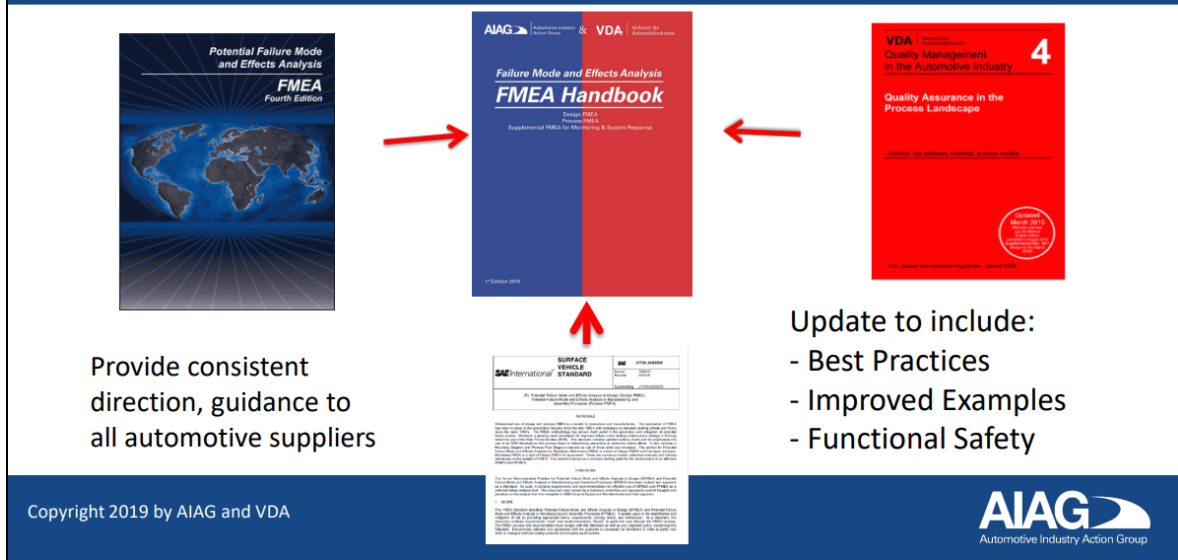


Figura 11 - Apresentação do FMEA Handbook

As empresas envolvidas neste trabalho foram:

Daimler Trucks North America, FCA US LLC, Ford Motor Company, General Motors, Honda of America Mfg., Inc., Nexteer Automotive, ON Semiconductor, Reliability Risk Redution, LLC, ZF TRW, AIAG, Continental AG, Daimler AG, Schaeffler Technologies AG & Co KG, Robert Bosch GmbH, Knorr-Bremse Systeme für Nutzfahrzeuge GmbH, VW Group, ZF Friedrichshafen AG, Ing-Buro Pfeufer, GKN Driveline, Lear Corp. Global HQ, Audi AG, Ford-Werke GmbH, Opel Automobile GmbH, Alpine Electronics (Europe) GmbH, Accuride Corporation, Adient, Axalta Coating Systems, BENTELER Automobiltechnik GmbH, Delphi, Dr. SCneider Holding GmbH, EBK Kruger GmbH & Co. KG, Faurecia Automotive GmbH, F&P America Manufacturing, Gunitex, Heinrich Huhn GmbH + Co. KG, IMS Gear SE & Co. KGaA, Iroquois Industries, Litens, Magna GETRAG B.V. & Co. KG, Magna International Inc., Mayco International LLC, Paul Craemer GmbH, PWO Progress-Werk Oberkirch AG, Wabco GmbH, Wallstabe & Schneider. [20]



# 3. ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

## 3.1 DEFINIÇÃO DE FMEA/FMECA

O FMEA é uma metodologia analítica de fiabilidade de sistemas, utilizada com o objetivo de analisar e reduzir as falhas de produtos, processos ou serviços, através da deteção de possíveis falhas, as suas causas e consequências no sistema/processo analisado. É uma ferramenta orientada a equipas e estruturada passo a passo para quantificar os efeitos de possíveis modos de falha, permitindo que se estabeleçam prioridades na gestão de riscos. [2] [3]

É um trabalho em grupo e não pode ser realizado individualmente. A equipa FMEA geralmente demonstra formações, opiniões e conhecimentos diferentes entre os membros e produz diferentes tipos de informações de avaliação, tais como, completas,

incompletas, precisas, imprecisas, conhecidas e desconhecidas devido à sua natureza multifuncional e multidisciplinar. [4] [5]

Desde a sua introdução em 1949 pelo Exército dos EUA e o seu posterior desenvolvimento na década de 1960 na indústria aeroespacial, a metodologia foi rapidamente adotada pela indústria automóvel e muitas outras indústrias. Tendo sido melhorado por diversas vezes com padrões e publicações científicas. Comparado com outras ferramentas de gestão de fiabilidade, o FMEA pode analisar um processo de alto risco e identificar vulnerabilidades para gerar medidas corretivas que ajudem a melhorar a fiabilidade. Assim, podem ser poupados custos, recursos e tempo prevenindo a ocorrência de causas que originem falhas. Atualmente, o FMEA é utilizado não só na indústria, mas também em outras áreas como saúde, transporte marítimo, alimentar, manutenção, etc. [6] [2]

Quando usado para classificar ou atribuir uma prioridade aos modos de falha, o FMEA também é conhecido como FMECA. No FMECA as prioridades de risco dos modos de falha são determinadas através do *Risk priority number* (RPN), que é uma função dos três parâmetros de risco: Ocorrência (O), Severidade (S) e Detecção (D), ou seja,  $RPN = O \times S \times D$ . [3] [7] [4] [8]

Com base em critérios pré-estabelecidos, é frequentemente atribuída uma escala de medição de 1 a 10 para avaliar cada um dos três fatores de risco, sendo 10 o número que indica o modo de falha mais grave, mais frequente e menos detetável, respetivamente. Depois de calcular os RPNs, os modos de falha são analisados usando uma distribuição de Pareto. Os modos de falha com RPNs mais altos podem ser vistos como mais importantes e devem ter maior prioridade para a mitigação de riscos. Todos os modos de falha identificados são recolhidos numa tabela standard de FMEA/FMECA e são sugeridas ou recomendadas ações para as situações anómalas que apresentam os maiores valores de RPN. Os resultados da análise de risco podem ser atualizados após a tomada de medidas preventivas, até que um valor satisfatório de RPN seja alcançado para todos os modos de falha listados. [2] [4] [8]

O fator de ocorrência é a probabilidade de o modo de falha ocorrer durante um determinado estágio do ciclo de vida do sistema. Ao comparar os valores de ocorrência

para todos os modos de falha, é possível identificar os modos de falha mais frequentes, para os quais os controlos preventivos poderão ser eficazes na redução dos seus riscos. [9] [7]

O fator de deteção é a probabilidade de que os controlos de deteção não detetem a ocorrência do modo de falha. O fator de deteção é usado para comparar diferentes modos de falha em relação à capacidade do controlo para detetar a ocorrência do modo de falha. [9] [7]

O fator de severidade é dado pela gravidade da consequência quando ocorre o modo de falha. Ao comparar os valores de severidade para todos os modos de falha, é possível identificar os modos de falha que são mais graves no caso de ocorrer o modo de falha. [9] [7]

Embora o método tenha quase 70 anos, na literatura ainda existem muitos investigadores, tanto da academia como da indústria, dedicados a melhorá-lo e a ultrapassar problemas ainda em aberto. [6]

Dada a sua simplicidade e visibilidade, o FMEA/FMECA tem sido amplamente utilizado em diversas áreas para melhorar o desempenho dos sistemas, por ser um poderoso e útil instrumento de avaliação de risco e fiabilidade. [2] [10] [11] [4] [5]

## 3.2 CRÍTICAS À METODOLOGIA FMEA/FMECA

O FMEA/FMECA tem também sido amplamente criticado pela existência de várias deficiências relacionadas com a avaliação dos modos de falha, na ponderação dos fatores de risco, que podem ter um julgamento diferente pelos diversos especialistas participantes da equipa, resultando num cálculo do RPN impreciso. [2] [12] [7] [11] [8]

As principais razões de crítica ao RPN são:

- Diferentes conjuntos de classificações O, S e D podem produzir exatamente ao mesmo valor de RPN, mas as suas implicações de risco ser totalmente diferentes.

Por exemplo, dois eventos diferentes com valores de 2, 3, 2 e 4, 1, 3 para O, S e D, respectivamente, terão o mesmo valor RPN de 12. No entanto, as implicações de risco dos dois eventos podem ser muito diferentes devido a diferença na gravidade da consequência da falha. Isto pode permitir que um evento de alto risco passe despercebido.

- A importância relativa entre O, S e D não é levada em consideração. Supõe-se que os três fatores têm a mesma importância. Este pode não ser o caso quando se considera uma aplicação prática do FMEA.
- A fórmula matemática para calcular o RPN é questionável e discutível. Não há razão para que O, S e D devam ser multiplicados para produzir o RPN.
- A conversão das pontuações é diferente para os três fatores. Por exemplo, uma conversão linear é usada para O, mas uma transformação não linear é empregada para D.
- Os RPNs não são contínuos e fortemente distribuídos na parte inferior da escala de 1 a 1000. Isto causa problemas na interpretação do significado das diferenças entre diferentes RPNs. Por exemplo, a diferença entre os RPNs vizinhos de 1 e 2 é igual ou menor que a diferença entre 900 e 1000?
- O RPN considera apenas três fatores principalmente em termos de segurança.
- Outros fatores importantes, como aspetos económicos, são ignorados.
- Pequenas variações numa classificação podem levar a efeitos muito diferentes no RPN, dependendo dos valores dos outros fatores. Para por exemplo, se O e D são ambos 10, então uma diferença de 1 ponto na classificação da gravidade resulta em uma diferença de 100 pontos no RPN; se O e D forem iguais a 1, então a mesma diferença de 1 ponto resulta em apenas uma diferença de 1 ponto no RPN; se O e D forem ambos 4, então uma diferença de 1 ponto produz uma diferença de 16 pontos no RPN.

- Os três fatores são difíceis de determinar com precisão. Muitas das informações constantes na sua classificação podem ser expressas de forma linguística como provável, importante, muito elevado, ou outras igualmente imprecisas ou ambíguas. [3] [10] [7] [4]

### 3.3 VARIANTES PROPOSTAS AO FMEA/FMECA

Na tentativa de resolver os problemas identificados e referidos, existem diversas propostas de melhoria ao FMEA tradicional, que apresentam variantes ao RPN.

#### 3.3.1 LARGE GROUP (LGFMEA)

Considerando um FMEA realizado por 20 participantes, podem existir muitas diferenças de atitude, conhecimento e interesse próprio, sendo difícil chegar a um consenso entre os membros da equipa. Para resolver este problema foi desenvolvido um novo modelo para definir a prioridade de risco, capaz de lidar com este desafio através da utilização de análise de cluster, teoria da perspectiva e um método baseado em entropia para derivar os pesos dos fatores de risco de forma objetiva, utilizando as informações de avaliação de risco. [2]

#### 3.3.2 ELECTRE TRI

Ao contrário do RPN clássico, o ELECTRE TRI permite ao decisor ter em consideração a importância relativa dos critérios bem como a incerteza em atribuir cada modo de falha a uma categoria de risco em vez de outra. O ELECTRE TRI é uma técnica que fornece uma forma de lidar com a incerteza do decisor durante o processo de avaliação por meio da introdução de limiares específicos, o que torna o método capaz de aproximar melhor a atitude do decisor, que geralmente é caracterizada por uma transição gradual do estado de indiferença para o estado de preferência. Além disso, ao contrário da abordagem RPN tradicional que retorna a classificação dos modos de falha, a metodologia baseada no ELECTRE TRI retorna a classificação dos modos de falha em categorias de risco para que seja possível visualizar e identificar diretamente os modos de falha aos quais devem ser aplicadas ações corretivas com a prioridade exigida pela classe a que pertencem. [3]

### 3.3.3 PROMETHEE (PREFERENCE RANKING ORGANIZATION METHOD FOR ENRICHMENT EVALUATION)

Neste método são adotados números neutrosóficos linguísticos para obter a avaliação dos decisores em relação aos modos de falha em cada critério de risco. É aplicada uma abordagem PROMETHEE modificada, baseada na teoria da regressão para obter a prioridade de risco dos modos de falha considerando os comportamentos psicológicos dos decisores. São também utilizados separadamente um modelo de desvio maximizador e TOPSIS (*Technique for order preference similar to ideal solution*) para derivar os pesos dos critérios de risco e dos decisores. [10]

### 3.3.4 VARIABLE PRECISION ROUGH SET THEORY AND TODIM (TOMADA DE DECISÃO INTERATIVA E MULTICRITÉRIO) METHOD

Trata-se da combinação da teoria dos conjuntos aproximados de precisão variável com o método TODIM para classificação do risco dos modos de falha.

Para obter as informações subjetivas e vagas dos membros do FMEA no processo de avaliação de risco, é utilizada a teoria dos conjuntos aproximados de precisão variável devido ao seu mecanismo flexível de lidar com a incerteza sem exigir à partida informações adicionais. Ela pode refletir com flexibilidade as mudanças nas preferências dos membros do FMEA.

Posteriormente para reduzir o efeito de valores extremos de avaliação fornecidos pelos membros do FMEA, é adotado o operador OWA (*Ordered weighted averaging*) para agregar avaliações individuais precisas e o OWA aproximado também é utilizado para agregar avaliações aproximadas.

Por fim é utilizada a abordagem TODIM, um modelo comportamental de tomada de decisão considerando a racionalidade limitada dos membros do FMEA, para obter a priorização do risco dos modos de falha. [12]

### 3.3.5 DEMPSTER-SHAFFER THEORY (DST)

A Teoria de *Dempster-Shafer* (DST) de evidências é uma estrutura matemática adequada para lidar com a incerteza epistêmica que frequentemente afeta as avaliações de atribuição dos parâmetros de risco. Em particular, tais avaliações devem ser obtidas de especialistas em um intervalo ou forma precisa, e então propagadas oportunamente para

obter uma caracterização de múltiplos valores do RPN associado a cada modo de falha analisado. A fim de sintetizar as informações disponíveis e torná-las úteis para os objetivos de priorização dos modos de falha, são utilizadas as distribuições de Crença e Plausibilidade. [7]

### 3.3.6 FUZZY EVIDENTIAL REASONING AND FUZZY PETRI NETS

Trata-se de um novo método FMEA baseado em raciocínio *evidencial fuzzy* (FER) combinado com redes de *Petri fuzzy* (FPNs) para melhorar o FMEA clássico. *Fuzzy evidential reasoning* (FER) é a combinação do *Dempster-Shaffer Theory* (DST) com *distributed modelling framework for solving complex decision-making problems*.

Novamente por ser difícil obter informações de avaliação precisas sobre o risco de modos de falha, as estruturas de crença são utilizadas para lidar com as opiniões diversificadas, incertas e ambíguas dos especialistas. Além disso, as avaliações individuais dos membros da equipe FMEA são agregadas com o operador OWA para aliviar a influência de julgamentos injustos. Finalmente, para obter a classificação de risco dos modos de falha é implementado o algoritmo de raciocínio de FPNs baseado em regras *fuzzy if-then*, com isto, a diversidade e a hesitação das informações de avaliação de risco fornecidas por especialistas podem ser bem refletidas e modeladas usando estruturas de crença, as avaliações irracionais dos membros da equipe FMEA podem ser eliminadas utilizando o operador OWA no estágio de agregação de avaliações, o que pode tornar as informações de entrada mais precisas e por último, ao aplicar FPNs para a classificação de risco dos modos de falha, a importância relativa dos fatores de risco pode ser considerada no processo de raciocínio. Além disso, é estabelecido um algoritmo de raciocínio baseado em matrizes para tornar o processo de raciocínio mais eficiente. [11]

### 3.3.7 EVIDENTIAL REASONING (ER)

Metodologia recém-desenvolvida para análise de decisão de múltiplos atributos, a abordagem ER baseada em grupo pode captar a diversidade de opiniões dos membros da equipa FMEA e priorizar os modos de falha sob diferentes tipos de incertezas, como avaliação incompleta, ignorância e intervalos. O desenvolvimento do modelo de prioridade de risco usando a abordagem ER baseada em grupo, que inclui a avaliação de fatores de risco usando estruturas de crença, sintetizando estruturas de crença

individuais em estruturas de crença de grupo e agregando as estruturas de crença de grupo em estruturas de crença gerais, convertendo as estruturas de crença geral em pontuações de risco esperadas e classificando as pontuações de risco esperadas usando o *minimax regret approach* (MRA). [4]

### 3.3.8 FUZZY

Num RPN *fuzzy* (FRPN) a análise é realizada usando variáveis linguísticas difusas para ocorrência, gravidade e não detecção e, em seguida, usando uma regra base IF-THEN para interligar essas variáveis para alcançar o FRPN.

A lógica *fuzzy* pode ser utilizada para estimar o risco quando há incertezas nos parâmetros envolvidos no cálculo do risco. A lógica *fuzzy* não define limites precisos na classificação desses parâmetros. A matriz de risco *fuzzy* é desenvolvida usando uma frequência *fuzzy* e uma severidade *fuzzy*.

Os dados de entrada precisos de O, S e D são geralmente medidos numa escala de dez pontos e convertidos em valores difusos usando expressões linguísticas e funções de pertinência. Da mesma forma, a função de pertinência da saída (RPN) também é gerada.

Como exemplo, definindo 1000 regras para controlar o valor de saída e numa delas se a ocorrência for certa (10), a gravidade for significativa (6) e a não detecção baixa (6) então RPN será alto (9). [8]

### 3.3.9 CONSENSUS AND OPINION EVOLUTION-BASED FMEA APPROACH FOR RELIABILITY MANAGEMENT IN SOCIAL NETWORK AND UNCERTAINTY CONTEXTS

No processo de consenso no FMEA realizado por uma rede social, as opiniões dos participantes serão influenciadas e evoluirão. Partindo deste pressuposto, este é um modelo de consenso de rede social com distância mínima de ajuste para auxiliar os participantes do FMEA a obter um consenso, no qual os participantes utilizam uma abordagem de avaliação de distribuição linguística para representar as suas opiniões. Sendo considerado numa segunda fase, o fenómeno da evolução da opinião. [5]

## 3.4 MANUAL DE REFERÊNCIA FMEA [13]

### 3.4.1 PROPÓSITO E DESCRIÇÃO

A indústria é constantemente desafiada pelas crescentes exigências de qualidade do cliente, pela necessária otimização de custos dos produtos e processos e por uma maior complexidade, bem como a responsabilidade do projetista e do fabricante sobre o produto ou processo, exigida pela legislação.

O método FMEA é usado para abordar os aspetos técnicos da redução de riscos. O FMEA é um método analítico, sistemático, qualitativo e orientado para a equipa, destinado a:

- Avaliar os potenciais riscos técnicos de falha de um produto ou processo
- Analisar as causas e efeitos dessas falhas
- Documentar ações preventivas e de deteção
- Recomendar ações para reduzir o risco

Os fabricantes consideram diferentes tipos de risco, incluindo riscos técnicos, riscos financeiros, riscos de tempo e riscos de estratégia. O FMEA é utilizado para analisar os riscos técnicos para reduzir falhas e melhorar a segurança nos produtos e processos.

### 3.4.2 OBJETIVOS E LIMITES DO FMEA

O objetivo do FMEA é identificar as funções de um produto ou as etapas de um processo e os possíveis modos de falha, efeitos e causas associadas. Além disso, é utilizado para avaliar se os controlos de prevenção e deteção já planeados são suficientes e para recomendar ações adicionais. O FMEA documenta e segue as ações que são tomadas para reduzir o risco. A metodologia FMEA ajuda os engenheiros a dar foco e prioridade à prevenção da ocorrência de problemas de produto e /ou processo. Existem objetivos de negócios que são apoiados pelo FMEA e outras atividades, tais como:

- Aumentar a qualidade, fiabilidade, capacidade de produção, manutenção e segurança de produtos automóveis

- Garantir a hierarquia, ligação, interface, cascata e alinhamento de requisitos entre componentes, sistemas e veículos
- Reduzir os custos de garantia
- Aumentar a satisfação do cliente num mercado altamente competitivo
- Comprovar a análise de risco de produto e processo
- Redução de mudanças tardias no desenvolvimento
- Manter lançamentos de produtos sem defeitos
- Direcionar a comunicação nas relações internas e externas com clientes e fornecedores
- Construir uma base de conhecimento na empresa, ou seja, documentar as lições aprendidas
- Cumprir os regulamentos na aprovação de registo dos componentes sistemas e veículos.

As limitações do FMEA incluem o seguinte:

- É qualitativo (subjetivo), não quantitativo (mensurável)
- É uma análise de falha de ponto único, não uma análise de falha de vários pontos.
- Depende do nível de conhecimento da equipa que pode ou não prever o desempenho futuro.
- É um resumo das discussões e decisões da equipa, por tanto, a qualidade do relatório do FMEA está condicionada à habilidade de registo da equipa que pode refletir os pontos de discussão no todo, ou em parte (não é uma transcrição de uma reunião)

Para a análise quantitativa e a análise de falha multiponto, outros métodos como FTA (*fault tree analyses*) e FMEDA (*Failure mode, effects, and diagnostic analyses*) são usados.

Estes são os métodos que podem calcular e analisar as métricas relevantes (por exemplo, análise de falha de ponto único, falhas multiponto, falhas latentes) para alcançar um resultado de análise quantificado.

#### 3.4.3 INTEGRAÇÃO DO FMEA NA EMPRESA

O FMEA é uma atividade multidisciplinar que afeta todo o processo de realização do produto. A implementação do FMEA necessita ser bem planeada para ser totalmente eficaz. O método FMEA é um elemento integrante das atividades de desenvolvimento de produtos e desenvolvimento de processo. O FMEA pode reduzir o custo e o tempo de desenvolvimento do produto. Ele suporta o desenvolvimento de especificações abrangentes, planos de teste e planos de controlo.

#### 3.4.4 POTENCIAIS CONSIDERAÇÕES DO FMEA

O desempenho competente do FMEA e a implementação dos seus resultados estão entre as responsabilidades das empresas que projetam, fabricam e /ou montam produtos para a indústria automóvel. É fundamental que a análise leve em consideração as condições de funcionamento do produto durante a sua vida útil, principalmente no que diz respeito aos riscos de segurança e previsíveis (mas não intencionais) usos indevidos.

Quando o FMEA é realizado, os seguintes princípios são observados:

- **Transparente:** Os potenciais modos de falha são descritos em termos específicos e tecnicamente precisos, permitindo que um especialista avalie as causas da falha e os possíveis efeitos. As descrições são isentas de possíveis mal-entendidos. Termos carregados de emoção (por exemplo, perigoso, intolerável, irresponsável, etc.) não são apropriados.
- **Verdadeiro:** as consequências de possíveis falhas são descritas com precisão (por exemplo, potencial para odor, fumo, fogo, etc.)
- **Realista:** as causas da falha são razoáveis. Eventos extremos não são considerados (por exemplo, queda de rocha na estrada, falta de energia na fábrica, etc.). As falhas resultantes do uso indevido relativo à perceção, julgamento ou ação são consideradas previsíveis quando documentadas por

métodos sistemáticos (incluindo brainstorming, julgamento de especialistas, relatórios de campo, etc.). Falhas resultantes de uso indevido intencional (por exemplo, manipulação deliberada e sabotagem) não são consideradas.

- Completo: Potenciais falhas previsíveis não são ocultas. A preocupação em revelar muito *know-how* ao criar um FMEA correto e competente não é uma razão válida para um FMEA incompleto. Completude refere-se à totalidade do produto/processo em análise (por exemplo, elementos e funções do sistema). No entanto, a profundidade dos detalhes depende dos riscos envolvidos.

Os riscos técnicos de falha identificados no FMEA são avaliados como aceitáveis ou são atribuídas ações para reduzir ainda mais o risco. O status de fecho das ações para reduzir o risco é documentado.

#### 3.4.5 DESIGN FMEA

Um FMEA de projeto (DFMEA) é uma técnica analítica utilizada principalmente por um engenheiro/ equipa responsável pelo projeto como meio de garantir que, na medida do possível, os modos de falha potenciais e as suas causas ou mecanismos de falha associados foram considerados e tratados antes da liberação da peça para a produção.

O FMEA de projeto analisa as funções de um sistema, subsistema ou componente de interesse, a relação entre seus elementos subjacentes e os elementos externos fora do limite do sistema. Isso permite a identificação de possíveis pontos fracos do projeto para minimizar os riscos potenciais de falha.

Um sistema DFMEA é composto por vários subsistemas e componentes que são representados por elementos do sistema (item). As análises de sistema e subsistema dependem do ponto de vista ou responsabilidade. Os sistemas fornecem funções ao nível do veículo. Essas funções estendem-se por subsistemas e componentes. Para efeito de análise, um subsistema é considerado da mesma forma que um sistema.

As interfaces e interações entre sistemas, subsistemas, ambiente e clientes (por exemplo, Tier n, OEM e usuário final) podem ser analisadas no sistema FMEAs.

Dentro de um sistema pode haver software, elementos eletrônicos e mecânicos. Exemplos de sistemas incluem: veículo, sistema de transmissão, sistema de direção, sistema de travagem, sistema eletrônico de controlo de estabilidade, etc.

Um componente DFMEA é um subconjunto de um sistema ou subsistema DFMEA. Por exemplo, um motor elétrico é um componente do elevador de janela, que é um subsistema do sistema elevador de janela.

Uma carcaça para motor elétrico também pode ser um componente ou peça. Por esta razão, os termos “elemento do sistema” ou “item” são usados independentemente do nível de análise.

O FMEA de projeto também pode ser usado para avaliar os riscos de falha de produtos não automotivos, como máquinas e ferramentas. As ações resultantes da análise podem ser usadas para recomendar alterações de projeto, testes adicionais e outras ações que reduzem o risco de falha ou aumentam a capacidade de um teste detetar falhas antes da entrega do desenho à produção.

#### 3.4.6 PROCESS FMEA

Ao contrário do FMEA de projeto (DFMEA) que analisa as possibilidades de falhas que podem ser criadas durante a fase de projeto de produto, o FMEA de processo (PFMEA) analisa as possíveis falhas dos processos de fabrico, montagem e logística para produzir produtos que estejam em conformidade com a intenção do projeto. As falhas relacionadas ao processo são diferentes das falhas analisadas no design FMEA.

O FMEA de processo analisa os processos considerando os possíveis modos de falha que podem resultar da variação do processo, para estabelecer prioridades de ações de prevenção e, quando necessário, melhorar os controlos. O objetivo geral é analisar os processos e agir antes do início da produção, para evitar defeitos indesejados relacionados com o fabrico e montagem e as suas consequências.

#### 3.4.7 SUPPLEMENTAL FMEA FOR MONITORING AND SYSTEM RESPONSE (FMEA-MSR)

Num FMEA suplementar para monitorização e resposta do sistema, as possíveis causas de falha que podem ocorrer nas condições operacionais do cliente são analisadas em relação

aos seus efeitos técnicos no sistema, veículo, pessoas e conformidade regulamentar. O método considera se as causas de falha ou modos de falha são detetados pelo sistema ou os efeitos de falha são detetados pelo condutor. A operação do cliente deve ser entendida como operação do utilizador final ou operação em serviço e operações de manutenção.

O FMEA – MSR inclui os seguintes elementos de risco:

- a) Severidade do dano, não conformidade regulatória, perda ou degradação da funcionalidade e qualidade inaceitável: representado por (S)
- b) Frequência estimada de uma causa de falha no contexto de uma situação operacional; representado por (F)
- c) Possibilidades técnicas para evitar ou limitar o efeito de falha por meio de detecção de diagnóstico e resposta automatizada, combinadas com possibilidades humanas para evitar ou limitar o efeito de falha via percepção sensorial e reação física; representado por (M)

A combinação de F e M é uma estimativa da probabilidade de ocorrência do efeito de falha devido à falha (causa da falha) e comportamento de mau funcionamento resultante (modo de falha).

É de notar que a probabilidade geral de ocorrer um efeito de falha pode ser maior, porque diferentes causas de falha podem levar ao mesmo efeito de falha.

O FMEA-MSR agrega valor ao avaliar a redução de riscos como resultado da monitorização e da resposta. O FMEA-MSR avalia o estado atual de risco de falha e deriva a necessidade de monitorização adicional por comparação com as condições de risco residual aceitável. A análise pode fazer parte de um FMEA de projeto em que os aspetos de desenvolvimento são complementados por aspetos de operação do cliente. No entanto, geralmente é aplicado apenas quando a deteção diagnóstica é necessária para manter a segurança.

A detecção do DFMEA não é o mesmo que a monitorização no FMEA-MSR suplementar. No DFMEA os controlos de detecção documentam a capacidade do teste de demonstrar o cumprimento dos requisitos no desenvolvimento e na validação. Para a monitorização que já faz parte do projeto do sistema, a validação destina-se a demonstrar que a monitorização de diagnóstico e a resposta do sistema funcionam como pretendido. Por outro lado, a monitorização em FMEA-MSR avalia a eficácia do desempenho da detecção de falhas na operação do cliente, assumindo que as especificações sejam atendidas.

A classificação de monitorização também compreende o desempenho seguro e a fiabilidade das reações do sistema as falhas monitorizadas. Contribui para a avaliação do cumprimento das metas de segurança e pode ser utilizado para derivar o conceito de segurança.

O FMEA-MSR suplementar aborda os riscos que no DMFEA seriam avaliados como altos, considerando mais fatores que refletem com precisão o risco avaliado mais baixo de acordo com as funções de diagnóstico do sistema operacional do veículo. Esses fatores adicionais contribuem para uma representação aprimorada do risco de falha (incluindo risco de dano, risco de não conformidade e risco de não cumprimento das especificações).

O FMEA-MSR contribui para o fornecimento de evidências da capacidade dos mecanismos de diagnóstico, lógico e de atuação para alcançar e manter um estado seguro ou compatível (em particular, capacidade apropriada de mitigação de falhas dentro do intervalo máximo de tempo de tratamento de falhas e dentro do intervalo de tolerância de tratamento de falhas).

O FMEA-MSR avalia o estado atual de risco de falha nas condições do utilizador final (não apenas o risco de danos às pessoas). A detecção de falhas/falhas durante a operação do cliente pode ser usada para evitar o efeito de falha original, alternando para um estado operacional degradado (incluindo a desativação do veículo) informando o motorista e/ou escrevendo um *Diagnostic Trouble Code* (DTC) na unidade de controlo para fins de serviço. Em termos de FMEA, o resultado da detecção e resposta diagnóstica FIÁVEL é eliminar (prevenir) o efeito original e substituí-lo por um novo efeito menos grave.

O FMEA-MSR é útil para decidir se o projeto do sistema atende aos requisitos de desempenho em relação à segurança e conformidade. Os resultados podem incluir itens como:

- Podem ser necessários sensores adicionais para fins de monitorização.
- Pode ser necessária redundância no processo
- Verificações de plausibilidade podem revelar mau funcionamento dos sensores

### 3.4.8 NOVA CLASSIFICAÇÃO ATION PRIORITY (AP)

Após a identificação dos modos de falha, das suas causas e efeitos, dos controlos de deteção incluídos e da respetiva cotação de todos os anteriores, será necessário definir as prioridades de atuação.

Nos antigos manuais a técnica utilizada era o RPN, como explicado anteriormente o produto dos valores atribuídos à severidade, à ocorrência e à deteção. Esta técnica foi muito criticada por diversos autores, mas como referido no manual, nunca deveria ser utilizada na sua forma pura, ou seja, um segundo critério é recomendado, sendo na indústria automóvel exigido pelos fabricantes aos seus fornecedores um RPN específico para um determinado valor de S, normalmente  $\geq 9$  e outro RPN para os restantes valores de S (1~8), sendo assim assegurado que qualquer RPN com valor reduzido, mas com cotação de S elevada tenha também uma elevada prioridade.

Na última versão do manual o RPN é substituído pelo AP, um método que cobre igualmente as 1000 combinações de Severidade, Ocorrência e Deteção e com o objetivo de dar mais ênfase primeiro à Severidade, depois à Ocorrência e por último à Deteção, resultando numa classificação de *High* (H), *Medium* (M) e *Low* (L) e que permite a utilização de um único critério na definição das prioridades.

Na Tabela 8 e na Tabela 9 são mostradas as combinações de S, O e D definidas e os seus resultados AP.

Tabela 8 - Action Priority (AP) [13]

<b>Action Priority (AP) for DFMEA and PFMEA</b>									
Action Priority is based on combinations of Severity, Occurrence, and Detection ratings in order to prioritize actions for risk reduction.							Blank until filled in by user		
Effect	S	Prediction of Failure Cause Occurring	O	Ability to Detect	D	ACTION PRIORITY (AP)	Comments		
Product or Plant Effect Very high	9-10	Very high	8-10	Low - Very low	7-10	H			
				Moderate	5-6	H			
				High	2-4	H			
				Very high	1	H			
		High	6-7	6-7	6-7	Low - Very low	7-10	H	
						Moderate	5-6	H	
						High	2-4	H	
						Very high	1	H	
		Moderate	4-5	4-5	4-5	Low - Very low	7-10	H	
						Moderate	5-6	H	
						High	2-4	H	
						Very high	1	M	
		Low	2-3	2-3	2-3	Low - Very low	7-10	H	
						Moderate	5-6	M	
						High	2-4	L	
						Very high	1	L	
Very low	1	1	1	Very high - Very low	1-10	L			
Product or Plant Effect High	7-8	Very high	8-10	Low - Very low	7-10	H			
				Moderate	5-6	H			
				High	2-4	H			
				Very high	1	H			
		High	6-7	6-7	6-7	Low - Very low	7-10	H	
						Moderate	5-6	H	
						High	2-4	H	
						Very high	1	M	
		Moderate	4-5	4-5	4-5	Low - Very low	7-10	H	
						Moderate	5-6	M	
						High	2-4	M	
						Very high	1	M	
		Low	2-3	2-3	2-3	Low - Very low	7-10	M	
						Moderate	5-6	M	
						High	2-4	L	
						Very high	1	L	
Very low	1	1	1	Very high - Very low	1-10	L			

Tabela 9 - Action Priority (AP) – Continuação [13]

Effect	S	Prediction of Failure Cause Occurring	O	Ability to Detect	D	ACTION PRIORITY (AP)	Comments
Product or Plant Effect Moderate	4-6	Very high	8-10	Low - Very low	7-10	H	
				Moderate	5-6	H	
				High	2-4	M	
				Very high	1	M	
		High	6-7	Low - Very low	7-10	M	
				Moderate	5-6	M	
				High	2-4	M	
				Very high	1	L	
		Moderate	4-5	Low - Very low	7-10	M	
				Moderate	5-6	L	
				High	2-4	L	
				Very high	1	L	
		Low	2-3	Low - Very low	7-10	L	
				Moderate	5-6	L	
				High	2-4	L	
				Very high	1	L	
Very low	1	Very high - Very low	1-10	L			
Product or Plant Effect Low	2-3	Very high	8-10	Low - Very low	7-10	M	
				Moderate	5-6	M	
				High	2-4	L	
				Very high	1	L	
		High	6-7	Low - Very low	7-10	L	
				Moderate	5-6	L	
				High	2-4	L	
				Very high	1	L	
		Moderate	4-5	Low - Very low	7-10	L	
				Moderate	5-6	L	
				High	2-4	L	
				Very high	1	L	
		Low	2-3	Low - Very low	7-10	L	
				Moderate	5-6	L	
				High	2-4	L	
				Very high	1	L	
Very low	1	Very high - Very low	1-10	L			
No discernible Effect	1	Very low - Very high	1-10	Very high - Very low	1-10	L	

*Priority High (H):* Maior prioridade para revisão e ação, a equipa tem de identificar medidas adequadas para melhorar controlos de prevenção e/ou deteção ou justificar e documentar o porquê de os controlos atuais serem adequados.

*Priority Medium (M):* Média prioridade para revisão e ação, a equipa deve identificar medidas adequadas para melhorar controlos de prevenção e/ou deteção ou a critério da empresa justificar e documentar o porquê de os controlos atuais serem adequados.

*Priority Low (L):* Baixa prioridade para revisão e ação, a equipa *Pode* identificar medidas adequadas para melhorar controlos de prevenção ou deteção.



# 4. IMPLEMENTAÇÃO DO FMEA EM EQUIPAMENTO INDUSTRIAL

## 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO OBJETO DE ESTUDO E DA SUA ENVOLVENTE

### 4.1.1 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA

A DS Smith é uma multinacional com várias divisões de negócio e que atua na área da reciclagem, produção de papel, cartão, painel favo, embalagens de cartão e diversos produtos realizados em cartão, como por exemplo, expositores de produtos alimentares. A DS Smith é também uma empresa produtora de energia elétrica, através de mini

gerações de painéis fotovoltaicos e de cogerações instaladas nas suas unidades produtivas.

NA divisão de Packaging, fabrico de cartão, embalagens de cartão, painel favo e displays, a DS Smith tem instaladas em Portugal 5 unidades produtivas, das quais a unidade de Esmoriz faz parte.

A unidade de Esmoriz tem cerca de 87000 m<sup>2</sup> e conta com 2 edifícios situados em 2 concelhos do distrito de Aveiro, um no de Santa Maria da Feira e outro no de Ovar, mas ambos apenas separados por um ribeiro, com 3 travessias, para Peões, veículos e produto acabado ou em curso. A Figura 12 mostra a fotografia aérea da unidade de Esmoriz.

A atividade da empresa inicia na extremidade de um dos pavilhões com a chegada do papel, que é posteriormente transformado em cartão canelado simples, duplo e simples face, sendo depois cortado em placas ou dobrado em *fanfold*.

Uma parte desta produção segue de forma automática para o segundo edifício, sendo paletizada, cintada e plastificada antes de ser armazenada ou expedida.

Outra parte da produção segue para um armazém automático intermédio que posteriormente alimenta 7 linhas de produção de embalagens de cartão, as embalagens produzidas seguem o mesmo percurso e operações em direção ao segundo edifício.

Durante um dia normal de produção são expedidos entre 50 e 60 camiões TIR de cartão ou embalagens de cartão.

Existe ainda no segundo edifício a produção de favo, a sua transformação em painel favo e a produção de diversos objetos compostos por painel favo, como por exemplo, placas, paletes, separadores de objetos a serem embalados e outros.



Figura 12 - DS Smith Packaging – Esmoriz [14]

#### 4.1.2 CARACTERIZAÇÃO DA LINHA

A linha emba é composta por um conjunto de equipamentos onde entram estivas de placas de cartão e podem sair paletes (a colocação de paletes foi centralizada para todas as linhas) de embalagens de cartão e que é composta pelos seguintes equipamentos:

- Um pre-feeder Alliance
- Uma case maker Emba (que dá o nome à linha)
- Uma cintadora Signode
- Uma paletizadora PARA

#### 4.1.3 CARACTERIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO

A máquina Emba é uma case maker que pode imprimir as placas de cartão utilizando até 4 cores, cortar a placa no formato pretendido, aplicar cola, dobrar a placa para formar a caixa e formar conjuntos iguais de caixas já coladas na saída da máquina. A **Error! Reference source not found.** mostra o equipamento, a imagem foi retirada do site do fabricante por uma questão de facilitar a tarefa de conseguir um bom plano de mais de 20 metros de máquina.

Uma das principais características deste equipamento é a velocidade, a máquina pode produzir até 17000 caixas/hora nos formatos de caixas menos complexos, esta velocidade é possível graças a todo o sistema de impressão e corte ser projetado com elementos rotativos, sendo a placa de cartão transportada pela máquina através de correias ou mantas perfuradas onde é aplicada aspiração que permite a fixação da placa.

O foco deste trabalho será neste equipamento.



Figura 13 - Máquina Emba

#### 4.1.4 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO

O equipamento Emba serve de uma forma geral para transformar placas de cartão canelado em caixas, através de um processo de fabrico em que a caixa vai sendo formada à medida que vai passando pelas diferentes etapas do processo ou módulos do equipamento. Na Figura 14 é possível visualizar um fluxograma com as diversas fases do processo, o que facilita o seu entendimento.

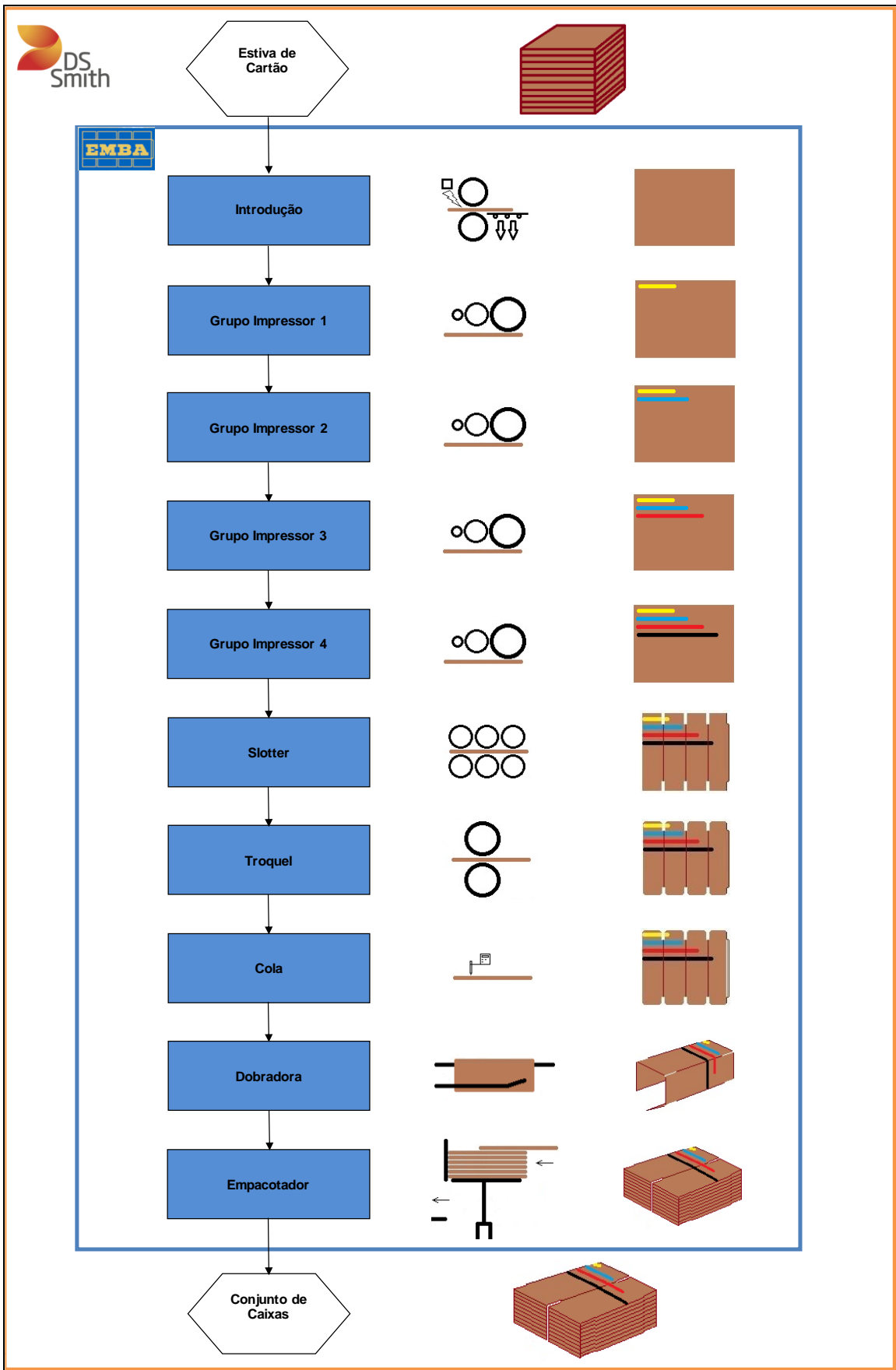


Figura 14 - Fluxograma do processo

A primeira fase do processo é a alimentação da máquina com placas de cartão, onde um conjunto de placas empilhadas é batido lateralmente e de forma contínua para garantir o seu alinhamento, a placa inferior é puxada para o interior do equipamento através de rolos e de aspiração que garante a aderência aos rolos, este processo e todos os que se seguem são contínuos e podem atingir a velocidade de 17000 caixas/hora. Ainda na introdução as placas são ionizadas para remover o pó que possa existir do processo de corte.

A seguir temos o processo de impressão, nos casos em que é utilizado, que pode variar pela utilização de 1 a 4 cores, sendo cada cor aplicada num grupo impressor diferente. O processo de impressão é feito por carimbo rotativo em que se utilizam 3 rolos, 1 rolo portador do molde da impressão que carimba a caixa, 1 rolo de anilox com determinado número de linhas e volume que passa a tinta ao rolo do carimbo por contacto e por último um rolo de borracha que garante através do contacto com o rolo de anilox que a quantidade de tinta não é excessiva. O rolo de anilox, mostrado na Figura 15, consiste num rolo com uma textura exterior em alvéolos microscópicos de diversos formatos onde é alojada a tinta para posterior transferência ao molde de impressão, a figura 16 mostra imagens ampliadas de formatos de alvéolos e exemplifica a sua posição no rolo.

O rolo de anilox pode ter um revestimento cerâmico, pode ser regravado quando apresentar desgaste e pode também passar por um processo de limpeza a laser de forma a recuperar volume pela remoção de resíduos de tinta. No processo de impressão a tinta pode ser aplicada por cada grupo em diferentes sítios da placa ou no mesmo sítio de forma a obter diferentes tonalidades. Uma das cores também pode ser verniz.

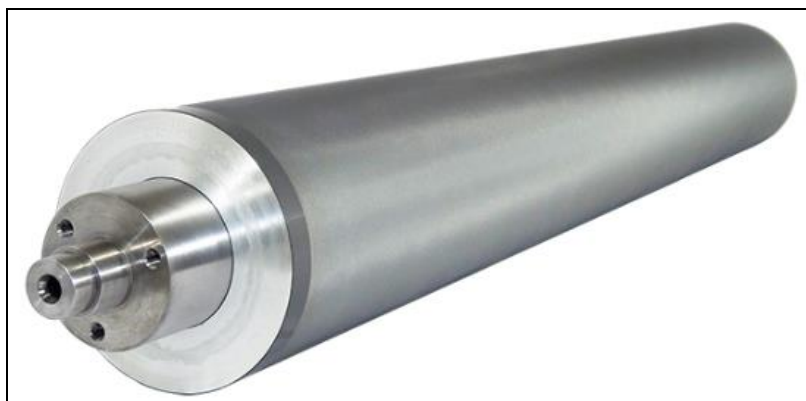


Figura 15 - Rolo Anilox

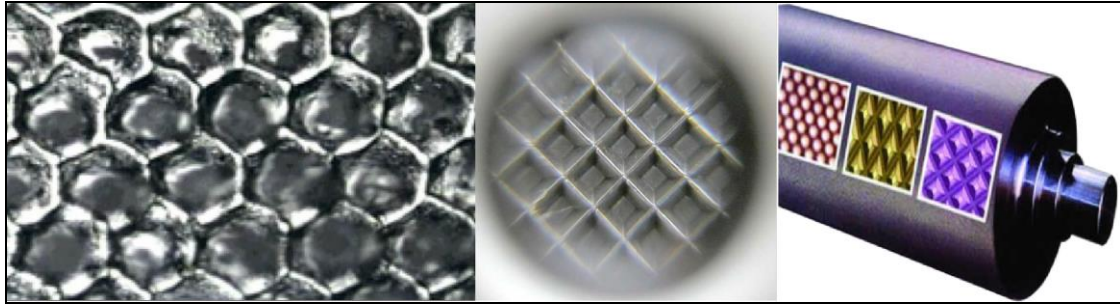


Figura 16 - Textura do Rolo Anilox

O processo seguinte passa por efetuar os vincos por onde a placa vai dobrar na formação da caixa e por efetuar os cortes mais simples da caixa que podem ser feitos por lâminas que se ajustam automaticamente na troca de referência de produção. Exemplos destes cortes são os limites longitudinais da placa, os escatéis (cortes que formam as abas do fundo e do topo) e da patilha onde leva a cola e fecha a caixa na lateral.

A seguir temos o último processo de corte que dá a forma final à placa, é feito com recurso a um molde, onde são feitos os cortes com detalhes mais difíceis, por exemplo cortes arredondados ou as aberturas para que o utilizador final consiga colocar as mãos para pegar na caixa. De seguida é aplicada a cola na patilha que irá fechar a caixa na lateral.

O processo seguinte consiste na passagem da placa por uma série de guias devidamente ajustadas que originam a dobra da placa pelos vincos criados anteriormente até às duas laterais se encontrarem, sendo que uma delas é a patilha já com cola aplicada, ficando a partir deste momento a caixa formada.

A caixa é posteriormente empilhada em grupos com quantidade definida e por último é transportada pilha a pilha até à saída.

#### 4.1.5 CARACTERIZAÇÃO DO DEPARTAMENTO DE MANUTENÇÃO

A equipa de manutenção interna é composta por 9 elementos, dos quais 6 são técnicos de manutenção, existindo 1 supervisor de manutenção, 1 responsável de armazém e o responsável geral. Os técnicos de manutenção estão divididos por 3 turnos que garantem a laboração contínua de segunda a sexta-feira e assegurando o suporte tanto a equipamentos com a infraestruturas. A equipa interna é frequentemente socorrida por equipas externas devido à falta de capacidade para o volume de trabalho ou em algumas situações devido à falta de conhecimentos e/ou ferramentas específicas (Automação, média tensão, frio, AVAC, construção civil, etc.). Esta situação ocorre tanto durante a semana como ao fim de semana. O organigrama do departamento de manutenção é mostrado na Figura 17.

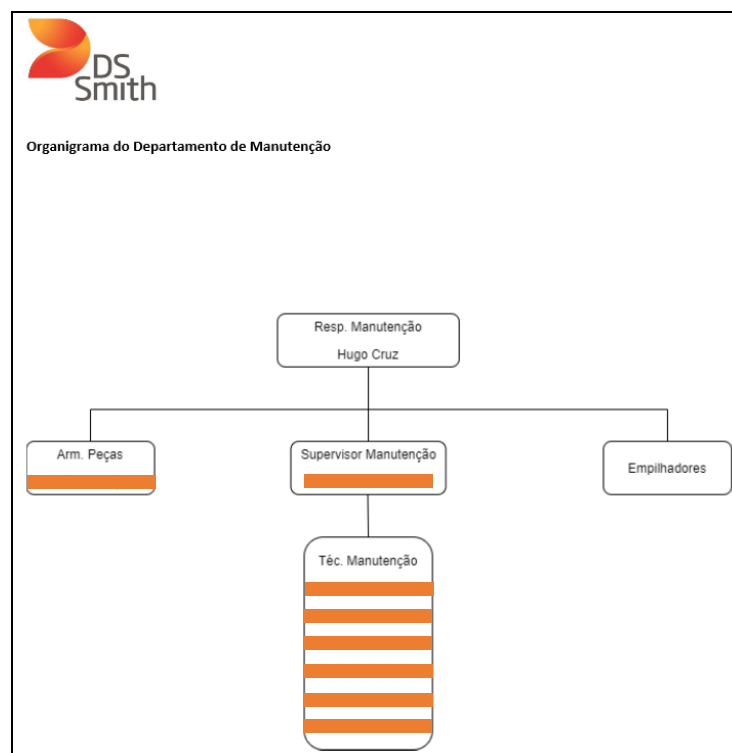


Figura 17 - Organigrama da manutenção

#### 4.1.6 CARACTERIZAÇÃO DA ITERAÇÃO ENTRE PRODUÇÃO-MANUTENÇÃO

A aplicação PC-Topp é um software de produção ligado aos equipamentos, onde é possível verificar em tempo real o estado das encomendas e dos equipamentos. Sempre que existe uma paragem do equipamento, o *software* regista essa paragem e é solicitada ao operador a causa da paragem, que poderá estar relacionada com diversos motivos e com os departamentos de qualidade, logística, manutenção, técnico, higiene e segurança, ou recursos humanos. A Figura 18, Figura 19, Figura 20 e Figura 21, são ecrãs do PC-Topp e mostram respetivamente a fila de encomendas, o desenho de uma caixa simples, o desenho de uma caixa com maior nível de dificuldade e o estado dos equipamentos.

The screenshot displays the PC-Topp software interface. The main window shows a list of orders under the heading 'Selecionar máquina'. The table includes columns for 'Ampl.', 'Dep.', 'Início', 'Dur.', 'Entrega', 'Carimbo', 'Tintas', 'Modelo', 'Artigo', 'Cartão', 'Quantity', 'Formato', and 'Seq.'. The orders are listed with various machine codes (e.g., BHS, ZELUS, GLT) and dates/times. The interface also shows a sidebar with navigation options and a top navigation bar with 'Esmorz' and 'PC-Topp' logos.

Figura 18 - PC-Topp - Fila de encomendas

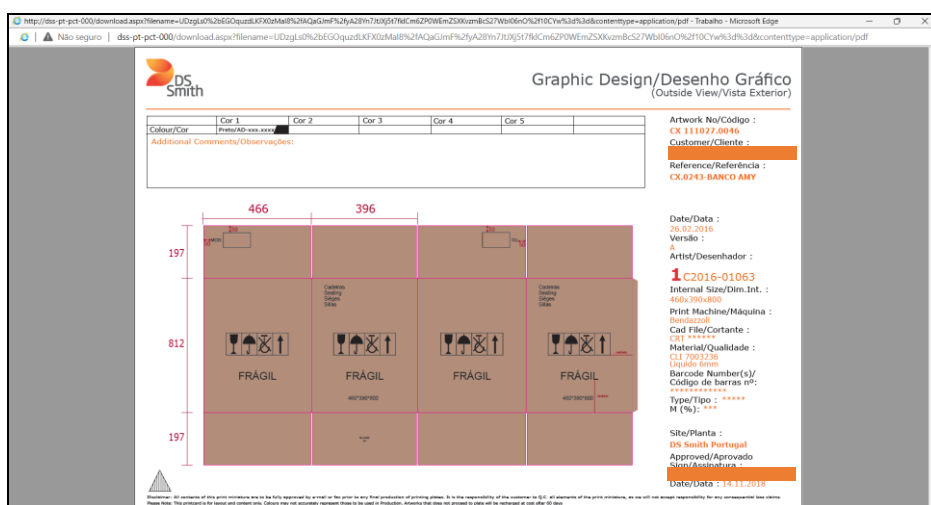


Figura 19 - PC-Topp - Desenho de caixa 1

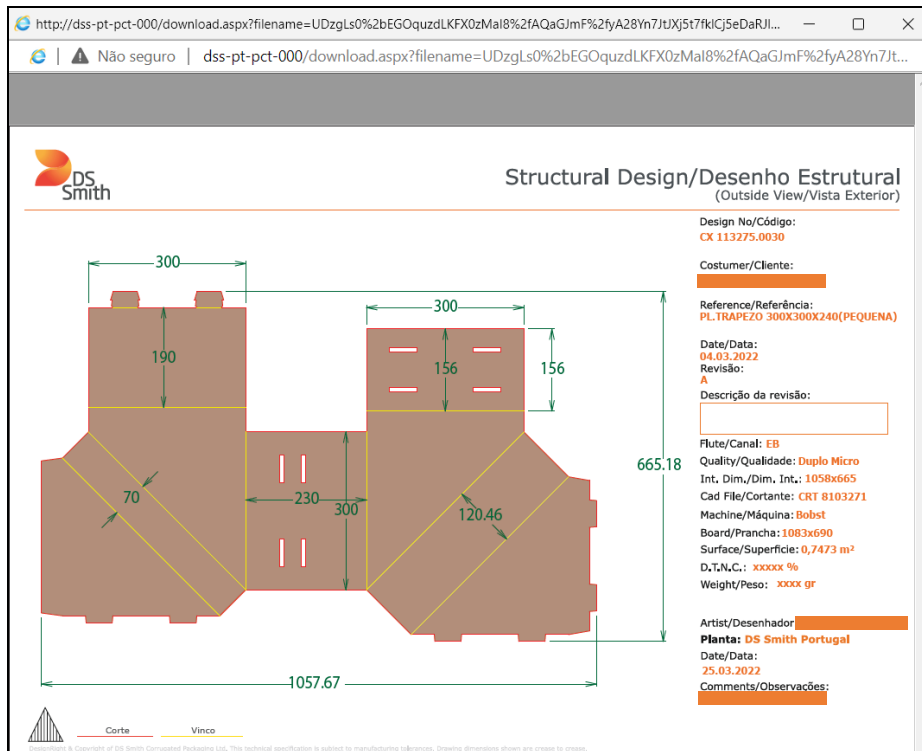


Figura 20 – PC-Topp - Desenho de caixa 2

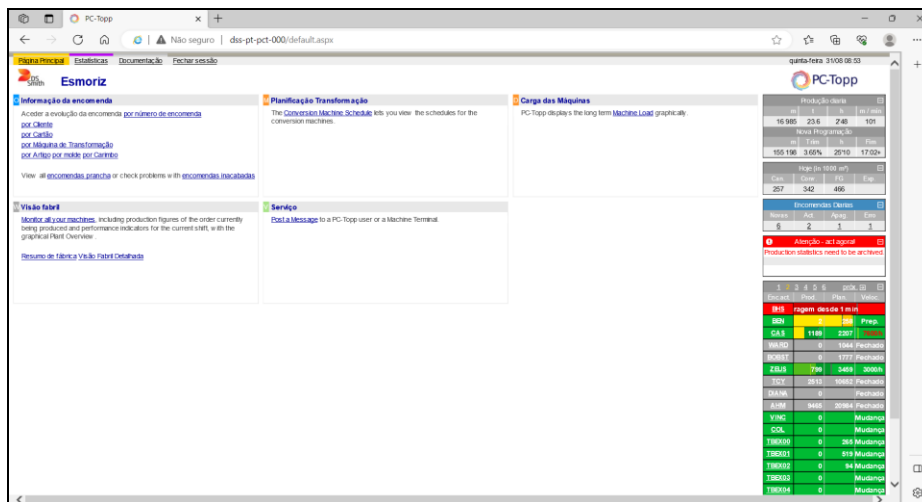



Figura 21 - PC-Topp - Estado dos equipamentos

As participações de avaria são um documento interno onde são registadas em cada ocorrência a informação mais relevante que operador consegue recolher. Posteriormente o técnico de manutenção completa o documento com o relatório dessa ocorrência.


**REGISTO DA MANUTENÇÃO** RM03/0  
 Pedido de Intervenção Embalagens

Intervenção N.º **5861**

---

**Instruções: A preencher pela Produção**

Data do Pedido: **23.05.2023** Hora: **19.40** Requisitado Por: **[Redacted]**  
 Máquina Parada:  Máquina Condicionada: \_\_\_\_\_ Máquina a trabalhar: \_\_\_\_\_

**1. MÁQUINA:** Amber  
**2. Local de paragem:**

- Toda a máquina
- Introdução
- Corpo Impressor nº \_\_\_\_\_
- Troque/slotter
- Ponte/vibrador
- Contador/ Stackler
- Cintagem
- Empilhamento

**3. PROBLEMA**

Rebentou corveia de introdução

Observações: \_\_\_\_\_

---

**Instruções: A preencher pela Manutenção**

Data recepção Pedido: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_ Hora: **19:50**

**1. MATERIAL APLICADO**

Unidades	Referência/Descrição	Armazém de recolha
1	PM02002903 HTD 1890	

**2. DESCRIÇÃO DA INTERVENÇÃO**

meter corveia nova

Reparação concluída:  **Necessita de Nova Intervenção:**   
 Fim da Intervenção: Hora **20:25**  
 ASS. Produção: **[Redacted]** ASS. Tec. Manutenção: **[Redacted]**

Figura 22 - Participação de avaria

Sempre que ocorre uma paragem por avaria o operador informa o chefe de linha que contacta por telefone o técnico de manutenção ou informa o chefe de turno para que este efetue o contacto. Em simultâneo deve introduzir a causa de paragem (ou sintoma) na aplicação PC-Topp e preencher a participação de avaria, que será completada pelo técnico de manutenção no fim da avaria.

Como será possível verificar no levantamento dos indicadores do equipamento no próximo capítulo, existe discrepância entre o tempo de paragem registado no PC-Topp e o tempo de paragem resultante das participações de avaria. Para colmatar esta diferença e para otimizar o registo e posterior análise dos tempos de paragem está em curso a implementação do software de manutenção DimoMaint.

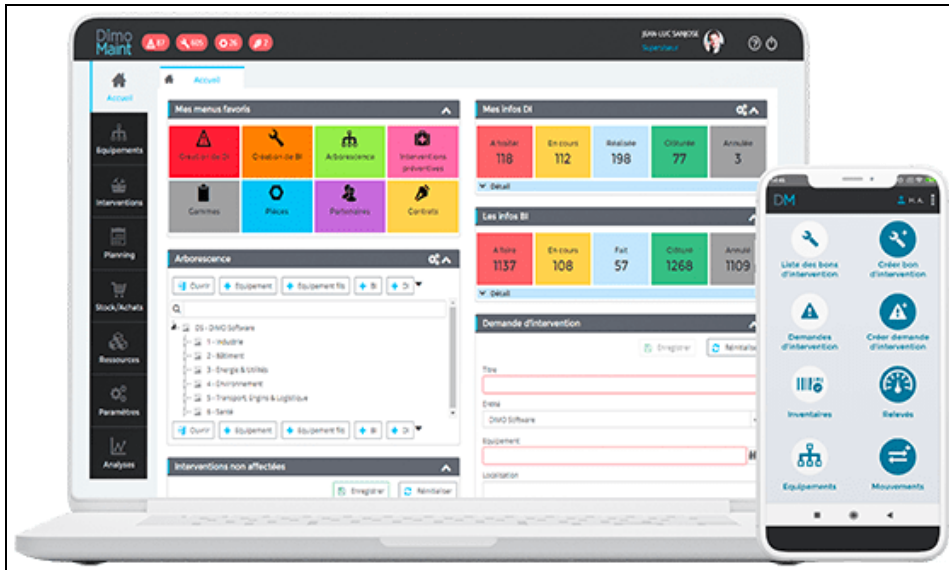


Figura 23 - DimoMaint

## 4.2 LEVANTAMENTO DE DADOS E INDICADORES DO EQUIPAMENTO

Numa primeira fase foi feita uma análise ao histórico de paragens da linha em causa, quer às paragens reportadas pela produção na aplicação Pctopp quer no registo efetuado pela equipa de manutenção em ficheiro excel alimentado pelas participações de avaria, abertas pela equipa de produção e fechadas pela equipa da manutenção. As paragens contabilizadas entram no grupo representado a amarelo na Figura 24.



Figura 24 - Classificação dos períodos de tempo

#### 4.2.1 INDICADORES RESULTANTES DA APLICAÇÃO PC-TOPP

Relativamente aos dados recolhidos na aplicação PC-Topp apenas foi possível recolher a informação de toda a linha Emba e não apenas do equipamento específico Emba, a separação não é feita no *software* por uma questão de simplicidade, uma vez que o principal foco do *software* não é a manutenção. No novo *software* Dimomaint está prevista uma divisão completa por equipamentos e ainda a subdivisão pelos principais componentes de cada equipamento. Na figura 25 é possível ver todos os equipamentos da linha Emba e todos os módulos componentes da máquina Emba que farão parte da lista de equipamentos do *software* DimoMaint.


 <span style="float: right;">LISTA GERAL <span style="margin-left: 20px;">LG13/0</span></span>									
Lista de equipamentos									
Linha	Código	Designação	Em serviço?	Marca	Modelo	Nºmaquina / Série	Ano	Ano retrol	
Emba		Pre-feeder	S	Alliance	Electrical block feeder	PD40863.1050	2020	2021	
Emba		Introdutor	S	Emba Machinery	-	721 071	2008		
Emba		Grupo 1 100 l 8 g	S	Emba Machinery	-	722 277	2008		
Emba		Grupo 2 120 l 7 g	S	Emba Machinery	-	722 278	2008		
Emba		Grupo 3 100 l 8g	S	Emba Machinery	-	722 279	2008		
Emba		Grupo 4 120 l 7g	S	Emba Machinery	-	722 280	2008		
Emba		Slotter	S	Emba Machinery	-	723 074	2008		
Emba		Troquel	S	Emba Machinery	-	724 071	2008		
Emba		Dobradora	S	Emba Machinery	-	725 071	2008		
Emba		Contador	S	Emba Machinery	-	726 078	2008		
Emba		Signode	S	Packaging Systems Group	ISB 13 MONO	SNCM140116	2014		
Emba		Tapete PARA	S	PARA	SC00	96073	2009		
Emba		Tapete PARA	S	PARA	SC00	96074	2009		
Emba		Cruzeta PARA	S	PARA	GR00	96075	2009		
Emba		Elevador entrada PARA	S	PARA	EL30	96076	2009		
Emba		Empilhador PARA	S	PARA	DS30	96077	2009		
Emba		Transfer saída PARA	S	PARA	CB00	96078	2009		
Emba		Elevador saída PARA	S	PARA	DO30	96079	2009		
Emba		Mete folhas PARA	S	PARA	MF30	96080	2009		
Emba		Aplicador de cola	S	Valco Melton	MCP-4 vertical lip Sealer	074XX086 / 18050592	2009		

Figura 25 - Lista de Equipamentos - Linha Emba

De acordo com os dados retirados do *software* PC-Topp e mostrados na Figura 26 no último ano fiscal (maio – abril) a linha Emba teve uma média de paragens de 6.55%, valor obtido dividindo o somatório de tempo de paragem dos meses em análise pelo somatório do tempo de trabalho dos mesmos meses, deste valor, apesar de não ser possível quantificar, sabemos que uma parte é da responsabilidade dos restantes 3 equipamentos incorporados na linha Emba (pre-feeder Alliance, cintadora Signode e Paletizadora PARA).

<b>LINHA EMBA PC-Topp</b>	mai/22	jun/22	jul/22	ago/22	set/22	out/22	nov/22	dez/22	jan/23	fev/23	mar/23	abr/23	Total
Tempo trabalhado(h)	398,00	313,76	333,56	228,74	367,75	374,25	405,95	204,58	383,01	365,78	398,75	294,37	4 068,50
Tempo de avarias (h)	28,90	24,90	18,55	18,72	13,70	38,50	19,50	9,80	22,78	19,17	34,87	17,12	266,51
Número de avarias	78	122	59	32	32	75	58	24	60	53	131	40	764
<b>MTBF (h)</b>	4,73	2,37	5,34	6,56	11,06	4,48	6,66	8,12	6,00	6,54	2,78	6,93	<b>4,98</b>
<b>MTTR(h)</b>	0,37	0,20	0,31	0,59	0,43	0,51	0,34	0,41	0,38	0,36	0,27	0,43	<b>0,35</b>
<b>TA (%)</b>	92,74%	92,06%	94,44%	91,82%	96,27%	89,71%	95,20%	95,21%	94,05%	94,76%	91,26%	94,18%	<b>93,45%</b>
<b>Downtime(%)</b>	7,26%	7,94%	5,56%	8,18%	3,73%	10,29%	4,80%	4,79%	5,95%	5,24%	8,74%	5,82%	<b>6,55%</b>

Figura 26 - Indicadores PC-Topp – Linha Emba

#### 4.2.2 INDICADORES RESULTANTES DAS PARTICIPAÇÕES DE AVARIA

Relativamente aos dados recolhidos das participações de avaria também para toda a linha, o valor reduz para 3.39%, como mostra a Figura 27 e por último, filtrando os dados apenas para o equipamento Emba este valor cai para 1.70%, como é possível verificar na Figura 28.

<b>LINHA EMBA PARTICIPAÇÕES</b>	mai/22	jun/22	jul/22	ago/22	set/22	out/22	nov/22	dez/22	jan/23	fev/23	mar/23	abr/23	Total
Tempo trabalhado(h)	398,00	313,76	333,56	228,74	367,75	374,25	405,95	204,58	383,01	365,78	398,75	294,37	4 068,50
Tempo de avarias (h)	11,40	18,08	9,10	4,57	4,62	20,77	5,53	6,08	22,02	8,03	16,97	10,73	137,90
Número de avarias	14	10	11	6	6	16	7	4	7	14	15	9	119
<b>MTBF (h)</b>	27,61	29,57	29,50	37,36	60,52	22,09	57,20	49,62	51,57	25,55	25,45	31,52	<b>33,03</b>
<b>MTTR(h)</b>	0,81	1,81	0,83	0,76	0,77	1,30	0,79	1,52	3,15	0,57	1,13	1,19	<b>1,16</b>
<b>TA (%)</b>	97,14%	94,24%	97,27%	98,00%	98,74%	94,45%	98,64%	97,03%	94,25%	97,80%	95,75%	96,35%	<b>96,61%</b>
<b>Downtime(%)</b>	2,86%	5,76%	2,73%	2,00%	1,26%	5,55%	1,36%	2,97%	5,75%	2,20%	4,25%	3,65%	<b>3,39%</b>

Figura 27 - Indicadores Participações de Avaria - Linha Emba

<b>EMBA PARTICIPAÇÕES</b>	mai/22	jun/22	jul/22	ago/22	set/22	out/22	nov/22	dez/22	jan/23	fev/23	mar/23	abr/23	Total
Tempo trabalhado(h)	398,00	313,76	333,56	228,74	367,75	374,25	405,95	204,58	383,01	365,78	398,75	294,37	4 068,50
Tempo de avarias (h)	9,32	2,12	3,67	4,17	1,38	18,40	3,92	5,25	7,00	2,62	5,68	5,62	69,13
Número de avarias	9	2	6	5	3	12	5	3	3	5	7	5	65
<b>MTBF (h)</b>	43,2	155,8	55,0	44,9	122,1	29,7	80,4	66,4	125,3	72,6	56,2	57,8	<b>61,5</b>
<b>MTTR(h)</b>	1,0	1,1	0,6	0,8	0,5	1,5	0,8	1,8	2,3	0,5	0,8	1,1	<b>1,1</b>
<b>TA (%)</b>	97,66%	99,33%	98,90%	98,18%	99,62%	95,08%	99,04%	97,43%	98,17%	99,28%	98,57%	98,09%	<b>98,30%</b>
<b>Downtime(%)</b>	2,34%	0,67%	1,10%	1,82%	0,38%	4,92%	0,96%	2,57%	1,83%	0,72%	1,43%	1,91%	<b>1,70%</b>

Figura 28 - Indicadores Participações de Avaria - Máquina Emba

## 4.3 CONSTRUÇÃO DO DOCUMENTO FMEA

Ao realizar este trabalho são consideradas as críticas dos diversos autores ao RPN. Estas críticas também são identificadas nos manuais de referência existentes, através da recomendação de utilização de um critério adicional ao RPN.

Neste trabalho será utilizada a classificação RPN com o uso do critério adicional de severidade, ou seja, para falhas com severidade 9 ou 10, o RPN objetivo máximo será de 39 numa escala de 1 a 1000.

Em simultâneo, será também utilizada a nova classificação AP da última versão do manual de FMEA.

### 4.3.1 PRÉ-REQUISITOS

Para dar início à implementação desta metodologia e considerando que o objetivo deste trabalho não é apenas a utilização única, mas sim a implementação da metodologia como ferramenta de trabalho habitual, foi necessário criar um documento de suporte com todas as informações necessárias à implementação da ferramenta, desde a descrição, os requisitos, os inputs, os outputs, os documentos a utilizar, os responsáveis, as instruções de preenchimento dos pontos mais relevantes da tabela de FMEA, a tabela de severidade, a tabela de ocorrência, a tabela de deteção, a tabela AP - *Action Priority*, as revisões feitas ao documento, o registo de presenças nas reuniões necessárias, o fluxograma do processo, a tabela de FMEA com folha de cálculo simplificada, e por último a tabela e gráfico de seguimento da evolução do RPN e das ações fechadas. Todos os documentos referidos foram sintetizados num único ficheiro *excel* com diversos separadores. A capa ou primeiro separador é mostrado na Figura 29 .

**FMEA**

DS  
Smith  
ISS-xxx-xxx

**Propósito**

- Formato para a realização de FMEA nos equipamentos

**Abrangência**

- Equipamentos da DS Smith, fábrica de ementa

Documentos relacionados

- Relatório PC TOPP
- RMOG00 Participações de avaria

Emissão	Data	Descrição das alterações	Cancela ou substitui
1	Jul/23	Lançamento	

Autor	Hugo Cruz, Responsável de Manutenção
Verificado	Francois Barroco, Diretor de Operações
Proprietário	
Aprovado	

Figura 29 – FMEA – Capa

#### 4.3.2 DESCRIÇÃO DO FMEA

Aplicando uma simples e resumida definição, o FMEA é apresentado como um método de análise preventiva usado para identificar e avaliar os modos de falha do equipamento e os seus efeitos ao longo do ciclo de vida do equipamento.

É utilizado para identificar contramedidas para eliminar ou reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas, aumentar a sua deteção e assim tentar minimizar o seu efeito.

São definidos como requisitos:

- Identificação do equipamento e o levantamento de todas as suas funções
- Identificação dos modos de falha e possíveis efeitos
- Identificação das causas e controlos de deteção
- Cotação das severidades, ocorrências e deteções

- Cálculo do RPN e do AP
- Análise do resultado face ao objetivo e definição de ações quando se justifique
- O FMEA é realizado pelo Responsável de Manutenção, Supervisor de Manutenção
- O FMEA é aprovado pelo Diretor de Operações
- As ações identificadas devem ser implementadas a 100%
- A implementação das ações e a redução dos valores de RPN/AP deve ser seguida
- A eficácia das ações deve ser monitorizada

São definidos como inputs:

- Manual do fabricante
- Histórico de avarias
- Lições aprendidas
- Indicadores de paragem

São definidos como outputs:

- FMEA com o RPN e o AP calculados, com as respetivas ações definidas para os valores acima do objetivo
- Documentos de monitorização do plano de ações, do histórico e evolução dos principais problemas

São definidos e apresentados os documentos:

- Registo de revisões
- Registo de presenças
- Modelo para criação do fluxograma de processo

- Instruções de preenchimento da matriz FMEA
- Matriz FMEA
- Tabelas de classificação de severidade, ocorrência e detecção
- Tabela Action Priority
- Tabela e gráfico de seguimento de RPN apresentada neste documento

E finalmente como responsáveis pela implementação da ferramenta:

- Elaboração: Responsável de Manutenção e restante equipa FMEA
- Validação: Diretor de operações

O resultado é apresentado na Figura 30.

<b>FMEA</b>
<p><b>Descrição</b></p> <p>O FMEA é um método de análise preventiva usado para identificar e avaliar os modos de falha do equipamento e os seus efeitos ao longo do ciclo de vida do equipamento. É utilizado para identificar contramedidas para eliminar ou reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas, aumentar a sua deteção e assim tentar minimizar o seu efeito.</p>
<p><b>Requisitos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificação do equipamento e o levantamento de todas as suas funções</li> <li>- Identificação dos modos de falha e possíveis efeitos</li> <li>- Identificação das causas e controlos de deteção</li> <li>- Cotação das severidades, ocorrências e deteções</li> <li>- Cálculo do RPN e do AP</li> <li>- Análise do resultado face ao objetivo e definição de ações quando se e justifique</li> <li>- O FMEA é realizado pelo Responsável de Manutenção, Supervisor de Manutenção</li> <li>- O FMEA é aprovado pelo Diretor de Operações</li> <li>- As ações identificadas devem ser implementadas a 100%</li> <li>- A implementação das ações e a redução dos valores de RPN/AP deve ser seguida</li> <li>- A eficácia das ações deve ser monitorizada</li> </ul>
<p><b>Inputs</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Manual do fabricante</li> <li>- Histórico de avarias</li> <li>- Lições aprendidas</li> <li>- Indicadores de paragem</li> </ul>
<p><b>Outputs</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- FMEA com o RPN e o AP calculadas, com as respetivas ações definidas para os valores acima do objetivo</li> <li>- Documentos de monitorização do plano de ações, do histórico e evolução dos principais problemas</li> </ul>
<p><b>Documentos presentes a utilizar</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Registo de revisões</li> <li>- Registo de presenças</li> <li>- Modelo para criação do fluxograma de processo</li> <li>- Instruções de preenchimento da matriz FMEA</li> <li>- Matriz FMEA</li> <li>- Tabelas de classificação de severidade, ocorrência e deteção</li> <li>- Tabela Action Priority</li> <li>- Tabela e gráfico de seguimento de RPN apresentada neste documento</li> </ul>
<p><b>Responsabilidade</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Elaboração: Responsável de Manutenção e restante equipa FMEA</li> <li>- Validação: Diretor de operações</li> </ul>

Figura 30 - FMEA - Descrição



Tabela 11 – FMEA - Severidade

"S": TABELA DE CLASSIFICAÇÃO DA SEVERIDADE	
Para estimar a gravidade de uma falha funcional em relação ao utilizador final ou cliente a jusante.	
CRITÉRIO UTILIZADO	CLASSIFICAÇÃO DA SEVERIDADE
Funcionamento do equipamento, não causa qualquer problema à máquina e a situação não se degrada	1
Funcionamento do equipamento, não causa qualquer problema à máquina e a situação pode degradar	2
Funcionamento do equipamento, pode causar problemas à máquina e a situação vai degradar	3
Funcionamento do equipamento mas causa problemas à máquina	4
Funcionamento do equipamento mas consegue trabalhar sem afetar a produção	5
Funcionamento do equipamento e afeta a produção	6
O equipamento não funciona sem uma intervenção de aproximadamente 1h	7
O equipamento não funciona sem uma intervenção de aproximadamente 2h	8
O equipamento não funciona sem uma intervenção de aproximadamente 4h	9
O equipamento não funciona sem uma intervenção de aproximadamente 8h	10

Tabela 12 – FMEA - Ocorrência

"O" = TABELA DE CLASSIFICAÇÃO DA OCORRÊNCIA	
Probabilidade de ocorrer uma falha funcional devido a uma determinada causa.	
CRITÉRIO	CLASSIFICAÇÃO DA OCORRÊNCIA
Probabilidade de ocorrência a cada: 5 anos	1
Probabilidade de ocorrência a cada: 2 anos	2
Probabilidade de ocorrência a cada: 1 ano	3
Probabilidade de ocorrência a cada: 6 meses	4
Probabilidade de ocorrência a cada: 3 meses	5
Probabilidade de ocorrência a cada: 1 mês	6
Probabilidade de ocorrência a cada: 2 semanas	7
Probabilidade de ocorrência a cada: 1 semana	8
Probabilidade de ocorrência a cada: 1 dia	9
Probabilidade de ocorrência a cada: 1 turno	10

Tabela 13 – FMEA - Detecção

"D" : TABELA DE CLASSIFICAÇÃO DA DETEÇÃO	
Probabilidade de detectar uma falha entre as funções da máquina	
CRITÉRIO	CLASSIFICAÇÃO DA DETEÇÃO
Detetável automaticamente pela máquina dando alarme atempadamente para correção s	1
Detetável pelo operador com possibilidade de correção sem paragem	2
Detetável pelo técnico na manutenção nível 3, sendo corrigido sem paragem	3
Detetável automaticamente pela máquina mas obrigando a paragem planeada	4
Detetável pelo operador mas obrigando a paragem planeada	5
Detetável pelo técnico mas obrigando a paragem planeada	6
Detetável automaticamente pela máquina mas obrigando a paragem imediata	7
Detetável pelo operador mas obrigando a paragem imediata	8
Detetável pelo técnico mas obrigando a paragem imediata	9
Não detetável	10

Foi também adicionada a tabela AP (*Action Priority*) classificação que como já referido, substitui o RPN no manual de referência considerado para a realização deste trabalho, tendo para isso sido utilizada a tabela classificativa apresentada nesse mesmo manual (ver **Error! Reference source not found.**).

Tabela 14 – FMEA - AP

Severidade	Ocorrência	Deteção	Action Priority
9-10	8-10	7-10	H
		5-6	H
		2-4	H
		1	H
	6-7	7-10	H
		5-6	H
		2-4	H
		1	H
	4-5	7-10	H
		5-6	H
		2-4	H
		1	M
	2-3	7-10	H
5-6		M	
2-4		L	
1		L	
1	1-10	L	
7-8	8-10	7-10	H
		5-6	H
		2-4	H
		1	H
	6-7	7-10	H
		5-6	H
		2-4	H
		1	M
	4-5	7-10	H
		5-6	M
		2-4	M
		1	M
	2-3	7-10	M
5-6		M	
2-4		L	
1		L	
1	1-10	L	
4-6	8-10	7-10	H
		5-6	H
		2-4	M
		1	M
	6-7	7-10	M
		5-6	M
		2-4	M
		1	L
	4-5	7-10	M
		5-6	L
		2-4	L
		1	L
	2-3	7-10	L
5-6		L	
2-4		L	
1		L	
1	1-10	L	
2-3	8-10	7-10	M
		5-6	M
		2-4	L
		1	L
	6-7	7-10	L
		5-6	L
		2-4	L
		1	L
	4-5	7-10	L
		5-6	L
		2-4	L
		1	L
	2-3	7-10	L
5-6		L	
2-4		L	
1		L	
1	1-10	L	
1	1-10	L	



#### 4.3.7 FLUXOGRAMA DO PROCESSO

Foi efetuado um fluxograma do processo que deve sempre acompanhar a ferramenta FMEA de forma a facilitar o entendimento das diferentes fases de fabrico, o fluxograma foi já previamente mostrado na caracterização do processo (ver Figura 14) e consta no documento FMEA.

#### 4.3.8 ELABORAÇÃO DO FMEA

O equipamento em causa para este trabalho é uma case maker Emba modelo 245 do ano 2012, registada no cabeçalho do documento FMEA como mostra a Figura 33. O equipamento é formado por 13 setores, devidamente registados na primeira coluna, dos quais fazem parte os 4 grupos impressores, que por serem iguais foram agregados numa mesma análise.

Divididas pelos 13 setores, foram por sua vez identificadas 44 funções no equipamento com um total de 138 modos de falha e igual número de possíveis efeitos. Foram também encontradas um total de 365 causas que podem originar os modos de falha e os seus possíveis efeitos.

Relativamente aos controlos implementados, na prevenção foram registados 136, que de uma forma geral se baseiam na manutenção preventiva nível 1 e nível 3. Já em relação aos controlos de deteção temos 365, em igual número que as causas e que se baseiam em alertas ou erros gerados pela máquina, disparos de proteções térmicas, encravamentos que provocam a paragem, atividades manuais em que a falha é notada e por controlos visuais.

A fase seguinte passou pela classificação de:

- O modo de falha e o seu efeito, com um valor de severidade.
- A probabilidade de ocorrência da causa provocando o modo de falha, com um valor de ocorrência.
- A probabilidade do modo de falha ou do seu efeito serem detetados, atribuindo um valor de deteção.



#### 4.3.9 RESULTADOS DO FMEA

Feita a classificação, foram obtidos os resultados relativamente ao número de causas por valor de RPN apresentados na Tabela 16.

Considerando as críticas já referidas de diversos autores académicos e o facto de o próprio manual de referência do FMEA referir o risco de utilização do RPN como critério único, foi utilizado um critério adicional, a identificação das causas cujo efeito tenham uma cotação de severidade  $\geq 9$  e valor de RPN  $\geq 40$ , tendo sido obtido o resultado apresentado na Tabela 17.

Relativamente à nova classificação AP, os resultados obtidos foram os apresentados na Tabela 18.

Tabela 16 - Nº de causas/RPN

	RPN			Nº Causas
De	1	a	39	5
De	40	a	64	240
De	65	a	99	9
De	100	a	199	84
De	200	a	299	25
De	300	a	399	2
De	400	a	499	0
De	500	a	599	0
De	600	a	699	0
De	700	a	1000	0

Tabela 17 - Nº de causas/RPN quando  $S \geq 9$

	RPN			Nº se $S \geq 9$
De	1	a	39	0
De	40	a	64	3
De	65	a	99	
De	100	a	199	
De	200	a	299	
De	300	a	399	
De	400	a	499	
De	500	a	599	
De	600	a	699	
De	700	a	1000	

Tabela 18 - Nº de causas/AP

AP	Nº Causas
H	28
M	84
L	253

#### 4.3.10 ANÁLISE DE RESULTADOS DO FMEA

Obtidos os resultados, temos na classificação RPN, 27 causas com RPN superior a 200, enquanto que na classificação AP, 28 causas com cotação H (*High*). Pode-se assim concluir que com os critérios de classificação utilizados, a cotação H do novo sistema equivale a um RPN superior a 200.

Para os valores de RPN entre 100 e 199 encontramos 84 causas, o mesmo valor encontrado com a cotação M (*Medium*) na nova classificação AP e que de igual forma se pode concluir que a cotação M equivale a um RPN entre 100 e 199.

Para os valores de RPN inferiores a 100, o número de causas é de 254, enquanto que na nova classificação AP o número de causas com a cotação L (*Low*) é de 253, sendo os valores muito aproximados. Pode-se mais uma vez concluir que a cotação L equivale a um RPN inferior a 100.

Relativamente a causas que podem provocar um modo de falha com efeito cotado com severidade 9 ou 10 e em simultâneo um RPN superior a 40, foram encontradas 3.

#### 4.3.11 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO DE INTERVENÇÃO

Considerando que este trabalho é um projeto piloto, foi decidido atribuir um objetivo de RPN máximo de 199 e de 39 nos casos em que a severidade seja 9 ou 10 ou um AP de M, assim o foco foi dado às causas com RPN superior a 199, com RPN superior a 39 nos casos com valor de severidade de 9 ou 10 e AP com cotação H.

Para facilitar o processo de visualização, foi adicionada uma formatação condicional de cor laranja às células com RPN superior a 199 ou cotação H e da cor amarela às células com RPN entre 100 e 199 ou cotação M. Identificadas as causas que cumprem os requisitos ( $RPN \geq 200$ ,  $AP=H$  ou  $S \geq 9$  com  $RPN \geq 40$ ) as mesmas foram analisadas e definidas ações que baixem a probabilidade de ocorrência ou aumentem a probabilidade de deteção, uma vez que a severidade é constante. Foi também calculado o novo RPN/AP previsto após a implementação das ações planeadas, que apenas passará a efetivo com a





Tabela 22 – Seguimento RPN (Nº Causas/RPN com S>=9)

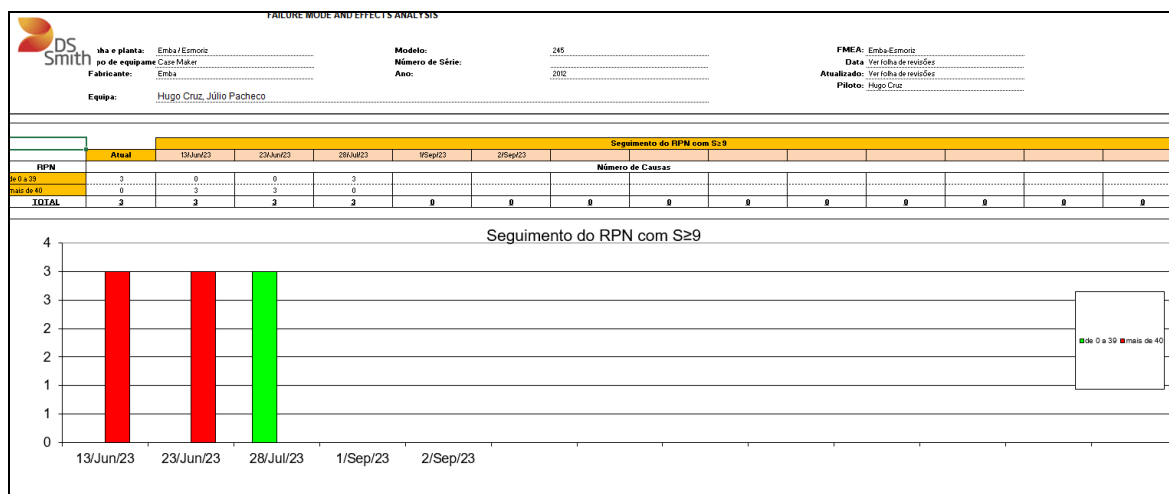
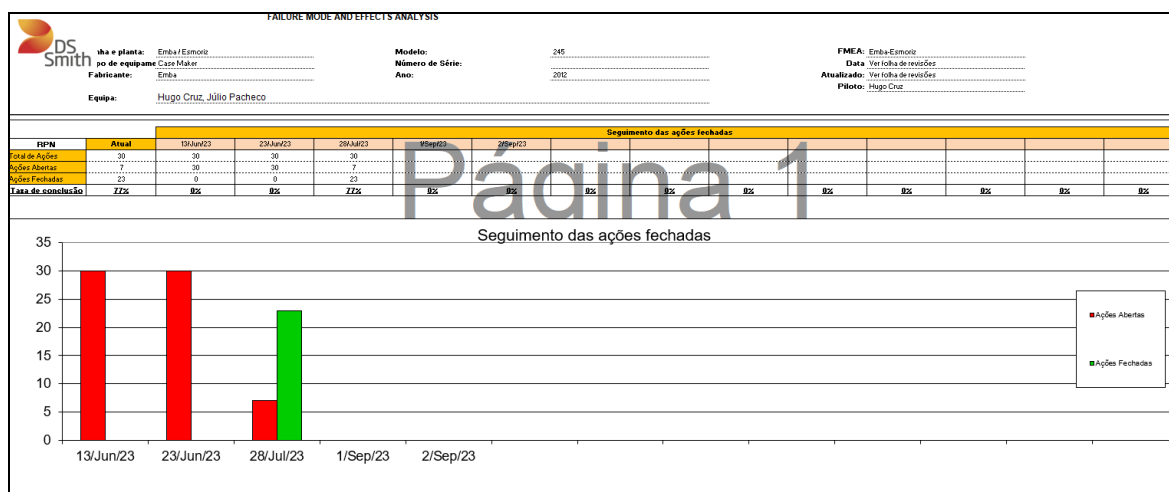


Tabela 23 - Seguimento RPN (Ações fechadas)



Nos gráficos anteriores é possível verificar a evolução do RPN à medida que as ações são fechadas. As ações estão a ser fechadas dentro da data, a atualização dos planos de manutenção preventiva, a definição de frequências de substituição e a criação de documentos com especificações. Como exemplo é mostrada na Figura 34 a especificação que foi criada para a curvatura do cartão.

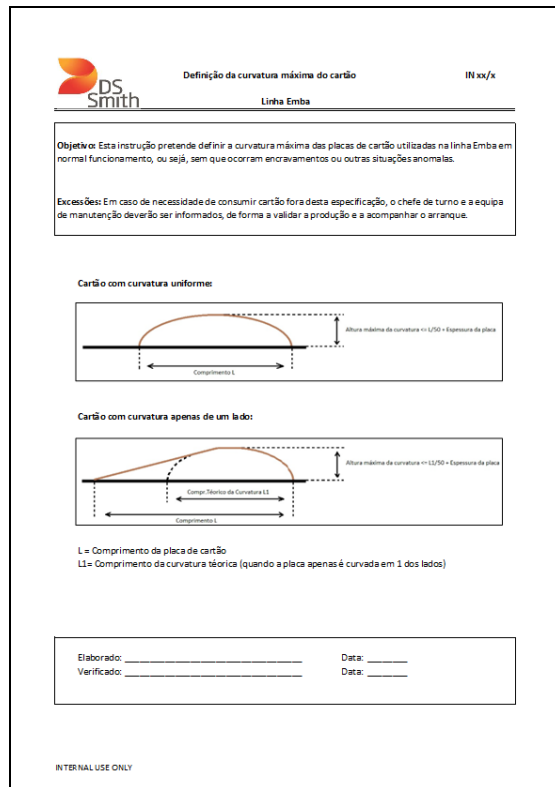


Figura 34 - Especificação para a curvatura máxima do cartão

## 4.4 LEVANTAMENTO DE INDICADORES APÓS A IMPLEMENTAÇÃO

Relativamente aos dados recolhidos sobre a evolução das paragens, o passo seguinte deste trabalho, a evolução positiva não está relacionada com a implementação das acções definidas na ferramenta FMEA, uma vez que as acções foram implementadas mas ainda não executadas, isto devido ao facto de no mês de agosto terem sido canceladas as manutenções preventivas como estratégia de conciliação das férias com os serviços mínimos de produção. De qualquer forma a metodologia será implementada.

### 4.4.1 INDICADORES RESULTANTES DA APLICAÇÃO PC-TOPP

Os dados recolhidos da aplicação PC-Topp mostram uma evolução positiva dos 3 indicadores, *Downtime*, MTTR e MTBF, sendo o valor melhor que o resultado do último mês e do último ano considerados no início do trabalho. A Figura 35 evidencia o resultado a referida evolução.

#### 4.4.2 INDICADORES RESULTANTES DAS PARTICIPAÇÕES DE AVARIA

Relativamente aos indicadores obtidos da recolha de dados das participações de avaria de toda a linha Emba, onde novamente é verificada uma diferença em relação à aplicação PC-Topp, o resultado tem novamente uma evolução positiva nos 3 indicadores, em relação ao último mês e ano considerados. O resultado é apresentado na Figura 36.

Filtrando as participações de avaria à máquina Emba, temos novamente uma evolução positiva, mas desta vez apenas nos indicadores Downtime e MTBF, o MTTR sofre uma pequena degradação. Os resultados são mostrados na Figura 37.

LINHA EMBA PC-Topp	mai/22	jun/22	jul/22	ago/22	set/22	out/22	nov/22	dez/22	jan/23	fev/23	mar/23	abr/23	Total	ago/23
Tempo trabalhado(h)	398,00	313,76	333,56	228,74	367,75	374,25	405,95	204,58	383,01	365,78	398,75	294,37	4 068,50	289,28
Tempo de avarias (h)	28,90	24,90	18,55	18,72	13,70	38,50	19,50	9,80	22,78	19,17	34,87	17,12	266,51	11,60
Número de avarias	78	122	59	32	32	75	58	24	60	53	131	40	764	38
MTBF (h)	4,73	2,37	5,34	6,56	11,06	4,48	6,66	8,12	6,00	6,54	2,78	6,93	4,98	7,31
MTTR(h)	0,37	0,20	0,31	0,59	0,43	0,51	0,34	0,41	0,38	0,36	0,27	0,43	0,35	0,31
TA (%)	92,74%	92,06%	94,44%	91,82%	96,27%	89,71%	95,20%	95,21%	94,05%	94,76%	91,26%	94,18%	93,45%	95,99%
Downtime(%)	7,26%	7,94%	5,56%	8,18%	3,73%	10,29%	4,80%	4,79%	5,95%	5,24%	8,74%	5,82%	6,55%	4,01%

Figura 35 - Indicadores PC-Topp linha Emba

LINHA EMBA PARTICIPAÇÕES	mai/22	jun/22	jul/22	ago/22	set/22	out/22	nov/22	dez/22	jan/23	fev/23	mar/23	abr/23	Total	ago/23
Tempo trabalhado(h)	398,00	313,76	333,56	228,74	367,75	374,25	405,95	204,58	383,01	365,78	398,75	294,37	4 068,50	289,28
Tempo de avarias (h)	11,40	18,08	9,10	4,57	4,62	20,77	5,53	6,08	22,02	8,03	16,97	10,73	137,90	5,90
Número de avarias	14	10	11	6	6	16	7	4	7	14	15	9	119	6
MTBF (h)	27,61	29,57	29,50	37,36	60,52	22,09	57,20	49,62	51,57	25,55	25,45	31,52	33,03	47,23
MTTR(h)	0,81	1,81	0,83	0,76	0,77	1,30	0,79	1,52	3,15	0,57	1,13	1,19	1,16	0,98
TA (%)	97,14%	94,24%	97,27%	98,00%	98,74%	94,45%	98,64%	97,03%	94,25%	97,80%	95,75%	96,35%	96,61%	97,96%
Downtime(%)	2,86%	5,76%	2,73%	2,00%	1,26%	5,55%	1,36%	2,97%	5,75%	2,20%	4,25%	3,65%	3,39%	2,04%

Figura 36 - Indicadores das participações de avaria da linha Emba

EMBA PARTICIPAÇÕES	mai/22	jun/22	jul/22	ago/22	set/22	out/22	nov/22	dez/22	jan/23	fev/23	mar/23	abr/23	Total	ago/23
Tempo trabalhado(h)	398,00	313,76	333,56	228,74	367,75	374,25	405,95	204,58	383,01	365,78	398,75	294,37	4 068,50	289,28
Tempo de avarias (h)	9,32	2,12	3,67	4,17	1,38	18,40	3,92	5,25	7,00	2,62	5,68	5,62	69,13	3,77
Número de avarias	9	2	6	5	3	12	5	3	3	5	7	5	65	3
MTBF (h)	43,2	155,8	55,0	44,9	122,1	29,7	80,4	66,4	125,3	72,6	56,2	57,8	61,5	95,2
MTTR(h)	1,0	1,1	0,6	0,8	0,5	1,5	0,8	1,8	2,3	0,5	0,8	1,1	1,1	1,3
TA (%)	97,66%	99,33%	98,90%	98,18%	99,62%	95,08%	99,04%	97,43%	98,17%	99,28%	98,57%	98,09%	98,30%	98,70%
Downtime(%)	2,34%	0,67%	1,10%	1,82%	0,38%	4,92%	0,96%	2,57%	1,83%	0,72%	1,43%	1,91%	1,70%	1,30%

Figura 37 - Indicadores das participações de avaria da máquina Emba



# 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

## 5.1 RESULTADO DO FMEA

Relativamente aos resultados obtidos, como já referido anteriormente a evolução positiva não está diretamente relacionada com a implementação das ações definidas e consequentemente com a análise dos modos de falha e respetivas causas, efetuada neste trabalho. Após a sua implementação é expectável que os resultados apresentem uma evolução positiva.

No caso da evolução não ser positiva, de acordo com a metodologia, o FMEA deverá ser revisto considerando os modos de falha atuais, as suas causas e definindo novamente ações que eliminem as mesmas.

O FMEA é uma ferramenta viva em que o surgimento de novas falhas deve ser analisado para servir de input a uma nova atualização, um ciclo contínuo, até que o resultado mostre uma convergência para os valores definidos como objetivo.

## 5.2 IMPLEMENTAÇÃO DO TRABALHO

A implementação da Ferramenta FMEA na indústria do cartão e embalagens de cartão representa uma inovação neste setor, por ser uma ferramenta com uma metodologia rigorosa e envolvente das equipas dos diversos departamentos num trabalho de otimização e melhoria contínua.

Neste projeto piloto não foram envolvidas equipas multidisciplinares como recomendado na metodologia, tal não seria vantajoso ao criar a ferramenta a partir do zero. A partir deste momento existem condições para na próxima utilização envolver mais pessoas, dando formação com as ferramentas agora existentes.

A ferramenta foi aplicada a um equipamento já com vários anos em utilização e com consequentes melhorias baseadas na experiência do dia a dia, sendo assim mais desafiante conseguir melhorar os resultados. Ao aplicar esta ferramenta a um novo equipamento em que ainda não exista a experiência de utilização, os outputs terão uma relevância mais significativa na criação da lista de peças críticas e dos planos de manutenção.

Com este trabalho foi criada uma nova variante da ferramenta FMEA, ao serem utilizados em simultâneo o RPN e o AP.

### 5.3 TRABALHOS FUTUROS

No futuro esta ferramenta deve ser transversalizada a toda a empresa, formando as pessoas na metodologia e em simultâneo inculcando o hábito de trabalho em equipa entre departamentos e desenvolvendo competências de análise e resolução de problemas.

Esta ferramenta deve ser aplicada logo à chegada de um novo equipamento, por ser o momento em que pode ser mais útil, colmatando a ausência do conhecimento inicial.

A ferramenta pode, de igual forma, ser aplicada aos equipamentos já existentes. Havendo agora documentos de suporte, e um guião a seguir, a sua implementação será facilitada.

Em futuros projetos a equipa deverá atuar em valores de RPN superiores a 100 ou de AP superiores a L.




## Referências Documentais

- [1] «J1739\_202101: Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) Including Design FMEA, Supplemental FMEA-MSR, and Process FMEA - SAE International». [https://www.sae.org/standards/content/j1739\\_202101/](https://www.sae.org/standards/content/j1739_202101/) (acedido 21 de setembro de 2023).
- [2] H.-C. Liu, X.-Y. You, F. Tsung, e P. Ji, «An improved approach for failure mode and effect analysis involving large group of experts: An application to the healthcare field», *Quality Engineering*, vol. 30, n.º 4, pp. 762–775, out. 2018, doi: 10.1080/08982112.2018.1448089.
- [3] A. Certa, M. Enea, G. M. Galante, e C. M. La Fata, «ELECTRE TRI-based approach to the failure modes classification on the basis of risk parameters: An alternative to the risk priority number», *Computers & Industrial Engineering*, vol. 108, pp. 100–110, jun. 2017, doi: 10.1016/j.cie.2017.04.018.
- [4] K.-S. Chin, Y.-M. Wang, G. Ka Kwai Poon, e J.-B. Yang, «Failure mode and effects analysis using a group-based evidential reasoning approach», *Computers & Operations Research*, vol. 36, n.º 6, pp. 1768–1779, jun. 2009, doi: 10.1016/j.cor.2008.05.002.
- [5] H. Zhang, Y. Dong, J. Xiao, F. Chiclana, e E. Herrera-Viedma, «Consensus and opinion evolution-based failure mode and effect analysis approach for reliability management in social network and uncertainty contexts», *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 208, p. 107425, abr. 2021, doi: 10.1016/j.res.2020.107425.
- [6] C. Spreafico, D. Russo, e C. Rizzi, «A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents», *Computer Science Review*, vol. 25, pp. 19–28, ago. 2017, doi: 10.1016/j.cosrev.2017.05.002.
- [7] A. Certa, F. Hopps, R. Inghilleri, e C. M. La Fata, «A Dempster-Shafer Theory-based approach to the Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA) under epistemic uncertainty: application to the propulsion system of a fishing vessel», *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 159, pp. 69–79, mar. 2017, doi: 10.1016/j.res.2016.10.018.
- [8] V. R. Renjith, M. Jose kalathil, P. H. Kumar, e D. Madhavan, «Fuzzy FMECA (failure mode effect and criticality analysis) of LNG storage facility», *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 56, pp. 537–547, nov. 2018, doi: 10.1016/j.jlp.2018.01.002.
- [9] K. O. Kim e M. J. Zuo, «General model for the risk priority number in failure mode and effects analysis», *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 169, pp. 321–329, jan. 2018, doi: 10.1016/j.res.2017.09.010.

- [10] J. Zhu, B. Shuai, G. Li, K.-S. Chin, e R. Wang, «Failure mode and effect analysis using regret theory and PROMETHEE under linguistic neutrosophic context», *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 64, p. 104048, mar. 2020, doi: 10.1016/j.jlp.2020.104048.
- [11] H. Shi, L. Wang, X.-Y. Li, e H.-C. Liu, «A novel method for failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning and fuzzy Petri nets», *J Ambient Intell Human Comput*, vol. 11, n.º 6, pp. 2381–2395, jun. 2020, doi: 10.1007/s12652-019-01262-w.
- [12] J. Li, H. Fang, e W. Song, «Failure Mode and Effects Analysis Using Variable Precision Rough Set Theory and TODIM Method», *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 68, n.º 4, pp. 1242–1256, dez. 2019, doi: 10.1109/TR.2019.2927654.
- [13] AIAG, «AIAG & VDA FMEA Handbook». <https://www.aiag.org/store/publications/details?ProductCode=FMEAAV-1> (acedido 8 de maio de 2023).
- [14] «Mapas Bing», *Mapas Bing*. <https://www.bing.com/maps/?cp=40.970711%7E-8.602345&lvl=16.8&style=a> (acedido 21 de setembro de 2023).



# Anexo B. Practice PD-AP-1307



**PREFERRED  
RELIABILITY  
PRACTICES**

**PRACTICE NO. PD-AP-1307  
PAGE 1 OF 2**

## **FAILURE MODES, EFFECTS AND CRITICALITY ANALYSIS (FMECA)**

---

**Practice:**

Analyze all systems to identify potential failure modes by using a systematic study starting at the piece part or circuit functional block level and working up through assemblies and subsystems. Require formal project acceptance of any residual system risk identified by this process.

**Benefit:**

The FMECA process identifies mission critical failure modes and thereby precipitates formal acknowledgment of the risk to the project and provides an impetus for design alteration.

**Program that Certified Usage:**

Viking, Voyager, Magellan, Galileo

**Center to Contact for More Information:**

Jet Propulsion Laboratory (JPL)


**Implementation Method:**

Through the use of formal spread sheets, each potential failure within an assembly is recorded together with its resultant assembly, subsystem, and system effect. The severity of the system failure effect is assigned from a pre-defined list ranging from "negligible effect" to "mission catastrophic." Design alterations can be made at the circuit level (thereby modifying the assembly level) to eliminate a failure mode or to reduce its severity. The remaining failures are evaluated as potential subsystem failures by accounting for possible redundancy or work-arounds. Again design alterations may be invoked. Those remaining up to the system level are reported as single points of failure (SPFs), and the project makes a conscious decision to either retain them or to initiate corrective action.

**Technical Rationale:**

Every technical mission carries with it a degree of risk. A mechanism is needed to identify and quantify the risk to permit decisions to be made which will ultimately reduce the risk to the minimum permissible level within the project cost, schedule, and performance constraints. Because most spacecraft systems are extremely complex, a method of risk identification must be used which has total visibility into the system. The FMECA has been recognized as such an approach and, if implemented rigorously, will provide the necessary visibility.

The process requires the assumption of a failure of each part of each unit. The credible failure modes are identified for each part (e.g., capacitors can short or open). If a piece part level FMECA is required by project definition, a line item must be entered for each identified mode of each part, e.g., "C23 shorts". If a



## FAILURE MODES, EFFECTS AND CRITICALITY ANALYSIS (FMECA)

---

project employs a high degree of redundancy, the complexity of a part level FMECA is unnecessary because a presumably redundant element will perform the function. Thus a functional level FMECA is adequate, e.g., "the amplifier chain formed by Q14, Q15, and Q16 and their associated parts has very low gain". This failure may have many root part failure causes but if all possible failure modes of the block are identified, e.g., "low gain, oscillation, high gain, high harmonic distortion", there is no value in recording the individual part causes. The most essential analysis in a design which uses redundancy is that of the cross-strapping networks. For this reason, a parts level FMECA is considered mandatory for all cross-strapped redundant elements, either inside an assembly or at an external interface.

### **Impact of Non-Compliance:**

Without a formal FMECA process, the system design integrity would be determined by the experience and rigor of a large number of individual design engineers. There would be no means of verifying that design risk has been minimized to a degree which yields a high confidence in achieving the mission goals.

# Anexo C. Military Standard MIL-STD-1629A

**MIL-STD-1629A**  
**24 NOVEMBER 1980**

**SUPERSEDING**  
**MIL-STD-1629 (SHIPS)**  
**1 NOVEMBER 1974**  
**MIL-STD-2070 (AS)**  
**12 JUNE 1977**

## **MILITARY STANDARD**

**PROCEDURES FOR PERFORMING  
A FAILURE MODE,  
EFFECTS AND CRITICALITY ANALYSIS**



AMSC N3074

FSC RELI

Anexo D. Potencial Failure Mode and Effects  
Analysis – FMEA Fourth Edition

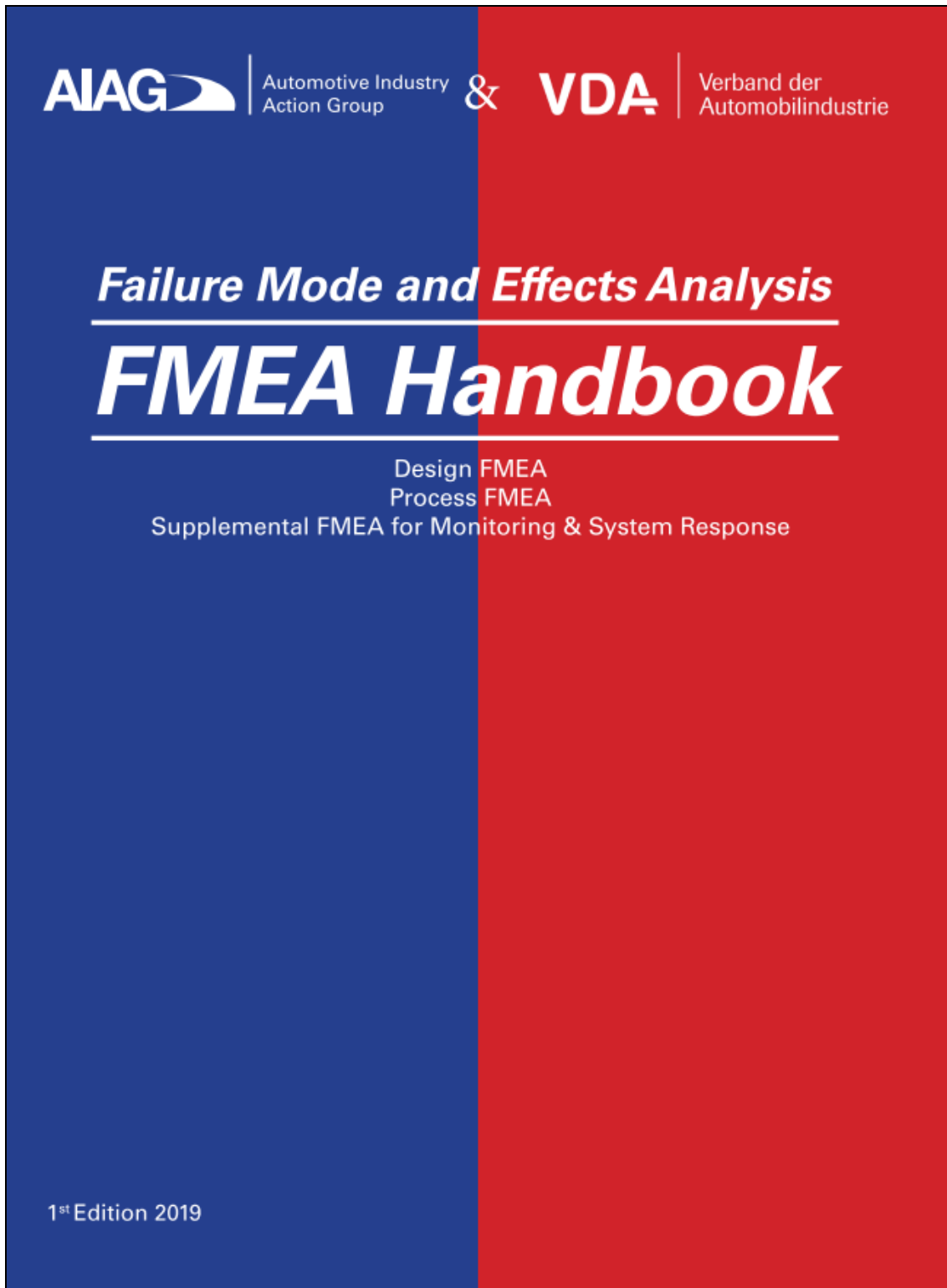


**POTENTIAL  
FAILURE MODE AND  
EFFECTS ANALYSIS  
(FMEA)**

Reference Manual  
Fourth Edition

First Edition, February 1993 • Second Edition, February 1995 • Third Edition, July 2001,  
Fourth Edition, June 2008  
Copyright © 1993, © 1995, © 2001, © 2008  
Chrysler LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation  
ISBN: 978-1-60534-136-1

# Anexo E. Failure Mode and Effects Analysis – FMEA Handbook



# Anexo F. International Standard IEC60812

This is a preview - click here to buy the full publication

**INTERNATIONAL  
STANDARD**

**IEC  
60812**


First edition  
1985

---

**Analysis techniques for system reliability –  
Procedure for failure mode and  
effects analysis (FMEA)**


*This English-language version is derived from the original bilingual publication by leaving out all French-language pages. Missing page numbers correspond to the French-language pages.*

---



Reference number  
IEC 60812:1985(E)

# Anexo G. SAE ARP5580

 <p><b>SAE</b> The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space® <b>INTERNATIONAL</b> 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA 15096-0001</p>	<p><b>AEROSPACE RECOMMENDED PRACTICE</b></p>	<p><b>SAE ARP5580</b></p>	
		<p>Issued 2001-07</p>	
<p>Recommended Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) Practices for Non-Automobile Applications</p>			
<p style="text-align: center;"><b>FOREWORD</b></p> <p>Engineers have always had to consider the effects of component failures on the systems and structures that they design. However, formal methodologies for these types of analyses were not developed until the early 1960s when the obvious safety and reliability requirements of the aerospace industry began to demand them (Reference 2.3.1). In the late 1960s several professional societies began to publish procedures for performing a Failure Modes and Effects Analysis (FMEA). One of the earliest of these was the Society of Automotive Engineers' Aerospace Recommended Practice, ARP926, "Fault/Failure Analysis Procedure" (Reference 2.1.1), published in 1967. In 1974 MIL-STD-1629 (ships), "Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis" (Reference 2.2.2) was published and, through several revisions, established the basic approach for analyzing a system. By the 1980s FMEA had become a standard part of the design process – at least in the aerospace industry. In 1988 Ford Motor Company published "Potential Failure Mode and Effects Analysis In Design (Design FMEA) and For Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA) Instruction Manual" (Reference 2.3.7) which applied the methodology to manufacturing processes as well as to the design of a product. This procedure focused on the particular needs of the automobile industry and, with input from the major American automobile manufacturing companies and their suppliers, evolved into SAE Surface Vehicle Recommended Practice, J1739 (Reference 2.1.4), issued by the SAE in 1994.</p> <p>In June of 1994, then Secretary of Defense William Perry issued a memorandum titled "Specifications and Standards – A New Way of Doing Business", which directed the Department of Defense to increase their reliance on commercial products and practices. As a result of "the Perry Memo", many US military standardization documents, including MIL-STD-1629, were cited for cancellation. Around the same time the Defense Standards Improvement Council (DSIC) was chartered to oversee the standardization reform process. DSIC coordinated its position on MIL-STD-1629 with the Society of Automotive Engineers, which through its G-11, Reliability, Maintainability, Supportability and Logistics (RMSL) Division had already chartered a subcommittee to create a new FMEA procedure updating MIL-STD-1629. The subcommittee was comprised of representatives from industry, government and academia. In response to that charter, this recommended best practice has been developed.</p>			
<p><small>SAE Technical Standards Board Rules provide that: "This report is published by SAE to advance the state of technical and engineering sciences. The use of this report is entirely voluntary, and its applicability and suitability for any particular use, including any patent infringement arising therefrom, is the sole responsibility of the user."</small></p> <p><small>SAE reviews each technical report at least every five years at which time it may be reaffirmed, revised, or cancelled. SAE invites your written comments and suggestions.</small></p> <p><small>Copyright 2001 Society of Automotive Engineers, Inc. All rights reserved.</small></p> <p><small>TO PLACE A DOCUMENT ORDER: (724) 776-4970 FAX: (724) 776-0790 SAE WEB ADDRESS: <a href="http://www.sae.org">http://www.sae.org</a></small></p> <p style="text-align: right;"><small>Printed in U.S.A.</small></p> <p><small>Document provided by IAG License#Boeings918778001. 02010205 1628-64 MSST Questions or comments about this message please call the Document Policy Group at 303-387-2295.</small></p>			

## Anexo H. VDA System FMEA

---

VDA

4

Quality Management  
in the Automotive Industry

---

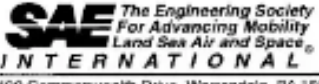
**Quality Assurance  
before series  
production**

**Part 2**

System FMEA

---

# Anexo I. ARP4761

		<b>AEROSPACE RECOMMENDED PRACTICE</b>		<b>SAE ARP4761</b>
400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA 15086-0001		Submitted for recognition as an American National Standard		Issued 1996-12
<b>GUIDELINES AND METHODS FOR CONDUCTING THE SAFETY ASSESSMENT PROCESS ON CIVIL AIRBORNE SYSTEMS AND EQUIPMENT</b>				
<b>TABLE OF CONTENTS</b>				
1.	SCOPE .....			4
1.1	Purpose .....			4
1.2	Intended Users.....			4
1.3	How To Use This Document .....			4
2.	REFERENCES.....			6
2.1	Applicable Documents .....			6
2.1.1	SAE Publications.....			6
2.1.2	U.S. Government Publications .....			6
2.1.3	FAR Publications.....			6
2.1.4	RTCA Publications.....			6
2.1.5	Other References.....			6
2.2	Definitions.....			7
2.3	Acronyms.....			11
3.	SAFETY ASSESSMENT PROCESS.....			12
3.1	Safety Assessment Overview.....			12
3.2	Functional Hazard Assessment (FHA) .....			16
3.3	Preliminary System Safety Assessment (PSSA) .....			17
3.4	System Safety Assessment (SSA) .....			21
3.5	Verification Means Used for Aircraft Certification .....			22
4.	SAFETY ASSESSMENT ANALYSIS METHODS.....			22
4.1	Fault Tree Analysis/Dependence Diagram/Markov Analysis (FTA/DD/MA) .....			22
4.1.1	Applications of the FTA/DD/MA.....			22
4.1.2	Software in FTA/DD/MA.....			24
4.1.3	Average Exposure Time Probability .....			25
<p>SAE Technical Standards Board Rules provide that: "This report is published by SAE to advance the state of technical and engineering sciences. The use of this report is entirely voluntary, and its applicability and suitability for any particular use, including any patent infringement liability thereon, is the sole responsibility of the user."</p> <p>SAE reviews each technical report at least every five years at which time it may be reaffirmed, revised, or cancelled. SAE invites your written comments and suggestions.</p> <p>Copyright 1996 Society of Automotive Engineers, Inc. All rights reserved.</p> <p style="text-align: right;">Printed in U.S.A.</p>				

SAE ARP4761

TABLE OF CONTENTS (Continued)

4.2	Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) .....	25
4.3	Failure Modes and Effects Summary (FMES) .....	26
4.4	Common Cause Analysis (CCA) .....	26
4.4.1	Zonal Safety Analysis (ZSA) .....	27
4.4.2	Particular Risks Analysis (PRA) .....	27
4.4.3	Common Mode Analysis (CMA) .....	28
5.	SAFETY RELATED MAINTENANCE TASKS AND INTERVALS .....	28
6.	TIME LIMITED DISPATCH (TLD) .....	30
6.1	FADEC Application .....	30
APPENDIX A	FUNCTIONAL HAZARD ASSESSMENT (FHA) .....	31
APPENDIX B	PRELIMINARY SYSTEM SAFETY ASSESSMENT (PSSA) .....	40
APPENDIX C	SYSTEM SAFETY ASSESSMENT (SSA) .....	45
APPENDIX D	FAULT TREE ANALYSIS .....	50
APPENDIX E	DEPENDENCE DIAGRAMS .....	104
APPENDIX F	MARKOV ANALYSIS (MA) .....	108
APPENDIX G	FAILURE MODES AND EFFECTS ANALYSIS (FMEA) .....	135
APPENDIX H	FAILURE MODES AND EFFECTS SUMMARY (FMES) .....	147
APPENDIX I	ZONAL SAFETY ANALYSIS (ZSA) .....	151
APPENDIX J	PARTICULAR RISKS ANALYSIS (PRA) .....	156
APPENDIX K	COMMON MODE ANALYSIS (CMA) .....	159
APPENDIX L	CONTIGUOUS SAFETY ASSESSMENT PROCESS EXAMPLE .....	168