



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Mecânica



Avaliação do risco em ativos físicos baseada numa metodologia *Fuzzy-FMEA*

NUNO MIGUEL CANAS ANTUNES
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientador:

Prof. Doutor José Augusto da Silva Sobral

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Silvério João Crespo Marques
Vogais: Prof. Doutor Luís António Andrade Ferreira
Prof. Doutor José Augusto da Silva Sobral

Março de 2020



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Mecânica

Avaliação do risco em ativos físicos baseada numa metodologia *Fuzzy-FMEA*

NUNO MIGUEL CANAS ANTUNES
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientador:

Prof. Doutor José Augusto da Silva Sobral

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Silvério João Crespo Marques

Vogais: Prof. Doutor Luís António Andrade Ferreira

Prof. Doutor José Augusto da Silva Sobral

Março de 2020

Dedicatória

*Aos meus pais.
Aos meus falecidos avós, descansem em paz.*

Agradecimentos

A realização deste Trabalho Final de Mestrado só foi possível graças ao apoio e colaboração de algumas pessoas às quais gostaria de neste espaço deixar o meu profundo agradecimento.

Em primeiro lugar, ao Professor José Sobral na qualidade de meu orientador do Trabalho Final de Mestrado pelo apoio desmedido, disponibilidade e paciência desde o momento que propus o tema. Agradeço em especial a sua colaboração e compreensão na resolução de certas dificuldades que foram sentidas durante a execução do trabalho até chegar ao objetivo delineado.

À minha irmã Ana, pelo apoio na fase de revisão e análise crítica do documento.

Aos meus familiares mais chegados, em especial os meus pais por acreditarem nos objetivos traçados por mim quanto ao meu futuro próximo, garantido sempre o apoio e o conforto nos momentos mais difíceis desta etapa final.

Ao meu colega Eng. Tiago pela sua ajuda, em especial pelas apreciações construtivas, adicionado um valor incalculável ao desenvolvimento do presente estudo.

Por último, mas não menos importante um agradecimento eterno à Teresa, que compreendeu as minhas dificuldades nesta fase, dando motivação e apoio do qual precisava para finalizar esta etapa importante da minha vida.

Grato pela vossa dedicação.

*O documento apresenta-se segundo
o novo acordo ortográfico.*

Resumo

No contexto atual, a sustentabilidade das organizações surge como um aspeto essencial e transcendente aos demais departamentos de uma organização, desde a conceção de produto à responsabilidade social que a organização contribui com esse produto.

No âmbito da área industrial da presente era tecnológica, é necessário delinear e construir estratégias de negócio que permitam não só garantir a competitividade do produto, quer em aspetos qualitativos, quer em aspetos monetários, como também eliminar deficiências no desempenho global de uma organização, destacando as deficiências de produção, manutenção e as resultantes das anteriores.

A fim de colmatar tais deficiências no sector da Manutenção Industrial, foram desenvolvidas técnicas analíticas que apoiam a tomada de decisão no planeamento das ações de manutenção dos demais ativos físicos.

A presente dissertação foca-se na metodologia *FMEA* e limitações respetivas, propondo uma solução que tenha a capacidade de as mitigar. Esta solução agrega a metodologia *FMEA* a uma sequência de metodologias de decisão baseada em multicritérios, em concreto o *Analytical Hierarchy Process (AHP)* e a *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)*. O enquadramento da lógica *Fuzzy* na metodologia proposta, permite que seja quantificada a incerteza humana no processo de tomada de decisão.

Esta abordagem permite propor uma priorização mais expedita de 110 potenciais modos de falha de um caso de estudo, minimizando perdas na produção e aumentando o conforto e segurança dos colaboradores de uma organização, entre outros aspetos fundamentais ao sucesso da mesma.

Palavras chave: *AHP*, Avaliação de risco, *FMEA*, *F-TOPSIS*, Lógica *Fuzzy*, *MCDM*, Sistema de suporte à decisão, *TOPSIS*

Abstract

The sustainability of organizations is an important element to be considered in every department of an organization, from the product design to the organizations' social responsibility on that product and how it contributes to society.

As the present technological industrial sector grows, there's an urgent need to draw and develop new business strategies which not only ensures product competitiveness, in matters of quality and economy, but also allows identifying the deficiencies in the overall performance of an industrial organization, particularly the deficiencies of the industrial process, of production and maintenance and those resulting from the previous.

In order to solve those issues in the field of Industrial Maintenance, were created several analytical techniques which identify and rank the critical events of the equipment.

The present dissertation focuses on the FMEA methodology and its limitations, proposing a methodology to mitigate them. This solution proposes one methodology which adds to the FMEA methodology a sequence of multicriteria decision making approaches (MCDM), specifically the Analytical Hierarchy Process (AHP) and the Technique for Order Preference for Similarity to the Ideal Solution (TOPSIS). The framing of Fuzzy Logic in this proposed methodology allows human uncertainty to be quantified in the decision-making process.

This approach makes it possible to propose a prioritization of the 110 potential failure modes in a real a case study, minimizing losses in production and increasing the comfort and safety of the employees of the organization, among other aspects essential to its success.

Keywords: AHP, Decision support system, FMEA, Fuzzy logic, F-TOPSIS, MCDM, Risk assessment, TOPSIS

Índice

Dedicatória.....	i
Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Índice.....	vi
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas.....	xi
Lista de Abreviaturas, Acrónimos e de Siglas.....	xiii
Lista de Símbolos.....	xv
Lista de funções <i>Matlab</i>	xvi
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Motivação.....	4
1.4. Estrutura do trabalho.....	5
2. Metodologia <i>FMEA</i>	6
2.1. Definição e objetivos.....	6
2.2. Breve resumo histórico e setores de desenvolvimento da <i>FMEA</i>	8
2.3. Tipos de <i>FMEA</i>	10
2.3.1. <i>DFMEA</i>	10
2.3.2. <i>PFMEA</i>	12
2.4. Dissimilaridades entre <i>FMEA-FMECA</i>	13
2.4.1. Considerações.....	13
2.4.2. Determinação da criticidade.....	14
2.5. Críticas à <i>FMEA</i>	19
2.5.1. Críticas benéficas.....	19
2.5.2. Críticas de limitação.....	19
3. Metodologias <i>MCDM</i>	22
3.1. Tomada de decisão baseada em multicritérios.....	22
3.2. Metodologia <i>AHP</i>	23
3.2.1. Aplicação da metodologia <i>AHP</i>	23
3.2.2. Algoritmo da metodologia <i>AHP</i>	24
3.3. Metodologia <i>DEMATEL</i>	28
3.3.1. Aplicação da metodologia <i>DEMATEL</i>	28

3.3.2.	Algoritmo da metodologia <i>DEMATEL</i>	29
3.4.	Metodologia <i>TOPSIS</i>	32
3.4.1.	Aplicação da metodologia <i>TOPSIS</i>	32
3.4.2.	Algoritmo da metodologia <i>TOPSIS</i>	33
3.5.	Metodologia <i>VIKOR</i>	34
3.5.1.	Aplicação da metodologia <i>VIKOR</i>	34
3.5.2.	Algoritmo da metodologia <i>VIKOR</i>	35
3.6.	Comentários adjacentes às metodologias MCDM	38
4.	Metodologia <i>F-TOPSIS</i>	40
4.1.	Lógica <i>Fuzzy</i> - enquadramento	40
4.2.	Metodologia <i>F-TOPSIS</i>	44
4.2.1.	Algoritmo da metodologia <i>F-TOPSIS</i>	45
4.3.	Comentários adjacentes à metodologia <i>Fuzzy-TOPSIS</i>	51
5.	Metodologia proposta <i>Fuzzy-FMEA</i>	52
5.1.	Metodologia <i>Fuzzy-FMEA</i> – Parte 1	53
5.1.1.	Estrutura hierárquica da metodologia <i>AHP</i> e suas definições.....	53
5.1.2.	Fluxograma da metodologia <i>AHP</i>	55
5.2.	Metodologia <i>Fuzzy-FMEA</i> – Parte 2.....	56
5.2.1.	Definições da metodologia <i>AHP</i> contextualizada e suas comparações par-a-par ..	56
5.2.2.	Definições da metodologia <i>TOPSIS</i> contextualizada e suas classificações	58
5.2.3.	Fluxograma da metodologia híbrida <i>AHP-TOPSIS</i>	59
5.3.	Metodologia <i>Fuzzy-FMEA</i> – Parte 3.....	61
5.3.1.	Caracterizações e definições globais da metodologia proposta.....	61
5.3.2.	Fluxograma da metodologia <i>Fuzzy-FMEA</i>	64
6.	Caso de estudo.....	66
6.1.	Caso de estudo – parte 1.....	69
6.1.1.	Determinação do peso dos critérios de RPN.....	69
6.1.2.	Análise da consistência lógica <i>AHP</i>	73
6.2.	Caso de estudo – parte 2.....	75
6.2.1.	Processo de cálculo do peso relativo aos critérios de avaliação de cada elemento do júri – metodologia <i>AHP</i>	75
6.2.2.	Processo de cálculo do peso relativo às avaliações de cada elemento do júri- metodologia <i>TOPSIS</i>	76
6.3.	Caso de estudo – parte 3.....	78
6.4.	Caso de estudo – análise de resultados.....	79
6.4.1.	Resposta às críticas da <i>FMEA</i> tradicional	79

6.4.2. Ranking dos potenciais modos de falha mais críticos - ensaios.....	82
6.4.3. Comparação do ranking <i>FMEA</i> clássica vs <i>Fuzzy-FMEA</i>	84
7. Conclusões e trabalhos futuros.....	88
7.1. Conclusões	88
7.2. Trabalhos futuros.....	89
Referências bibliográficas	91
Anexos.....	98
Anexo I.....	99
Anexo II	103
Anexo III	106
Anexo IV.....	110
Anexo V	119
Anexo VI.....	124
Anexo VII.....	131
Anexo VIII	137
Anexo IX.....	142
Anexo X	147
Anexo XI.....	155
Anexo XII.....	159
Anexo XIII	163
Anexo XIV	167
Anexo XV	178

Índice de Figuras

Figura 1 - Relação no sector Manutenção entre custo vs disponibilidade do sistema (Fonte: Adaptado de [1])	1
Figura 2 - Critérios-chave de sucesso à gestão da manutenção.....	2
Figura 3 - Quadro síntese dos argumentos e objetivos da implementação FMEA	7
Figura 4 - Aplicabilidade da FMEA nos demais setores de interesse social (Fonte: Adaptado de [39]).....	9
Figura 5 - Exemplo de um diagrama de Ishikawa contextualizado à FMEA.....	9
Figura 6 - Modelo do queijo suíço de James Reason (Fonte Adaptado de [44])	13
Figura 7- Distinção da FMEA vs FMECA segundo a norma IEC 60812	13
Figura 8 - Fluxograma de implementação de uma FMEA (Fonte: Adaptado de [51])	18
Figura 9 - Contributos da FMEA - síntese global (Fonte: Adaptado de [52])	19
Figura 10 - Abordagem da tomada de decisão baseada em multicritérios (Fonte: Adaptado de [60]).....	22
Figura 11 - Estrutura de hierarquização do método AHP - exemplo	23
Figura 12 - Diversificação da aplicabilidade da metodologia DEMATEL (Fonte: Adaptado de [73]).....	28
Figura 13 - Diagrama causa-efeito da metodologia DEMATEL (Fonte: Adaptado de [72])....	31
Figura 14 - Conceito da metodologia de VIKOR (Fonte: Adaptado de [85]).....	35
Figura 15- Matriz de decisão.....	36
Figura 16 - Esquema da sinergia entre metodologias MCDM	38
Figura 17 - Interface gráfica do software Matlab.....	39
Figura 18 - Passos de cálculo de um sistema baseada na lógica Fuzzy (Fonte: Adaptado de [93])	41
Figura 19 - Processo de desfuzzificação	44
Figura 20 - Representação de um número difuso- n (Fonte: Adaptado de [95])	46
Figura 21 - Representação de um número difuso- n com $\alpha - cut$ (Fonte: Adaptado de [95]) .	46
Figura 22 - Número difuso triangular- n (Fonte: Adaptado de [95])	47
Figura 23 - Esquema da metodologia proposta.....	52
Figura 24 - Estrutura hierárquica do algoritmo complementar-AHP	53
Figura 25 - Fluxograma do algoritmo AHP (Parte 1)	55
Figura 26 - Esquema da metodologia híbrida AHP-TOPSIS	56
Figura 27 - Fluxograma do algoritmo híbrido AHP-TOPSIS (Parte 2)	60
Figura 28 - Evolução do critério de Severidade difuso- funções de pertença para cada classificação	62
Figura 29 - Evolução do critério de Ocorrência difuso- funções de pertença para cada classificação	63
Figura 30 - Evolução do critério de Detetabilidade difuso- funções de pertença para cada classificação	64
Figura 31 - Contextualização da metodologia proposta face à análise FMEA global	64
Figura 32 - Esquema da metodologia proposta Fuzzy-FMEA.....	65
Figura 33 - Exemplo representativo do secador industrial rotativo TSK S-CD (M1-423) (Fonte: [105]).....	66
Figura 34 - Diferentes perfis de pás do tambor rotativo (Fonte: [106])	66
Figura 35 - Identificação dos itens relevantes de um secador industrial rotativo.....	67

Figura 36 - Contextualização do caso de estudo aplicado à metodologia proposta	68
Figura 37 - Árvore hierárquica com o peso dos critérios e o peso de cada alternativa respetivo a cada critério.....	72
Figura 38 - Diferentes pesos dos critérios de criticidade- metodologia AHP	73
Figura 39 - Introdução da avaliação difusa de cada elemento de júri - Metodologia proposta Fuzzy-FMEA.....	78
Figura 40 - Mecanismo de error-proofing no algoritmo Fuzzy-FMEA	81
Figura 41 - Ranking dos potenciais modos de falha do ensaio 1- Metodologia Fuzzy-FMEA ..	82
Figura 42 - Ranking dos potenciais modos de falha do ensaio 2- Metodologia Fuzzy-FMEA ..	82
Figura 43 - Ranking dos potenciais modos de falha do ensaio 3- Metodologia Fuzzy-FMEA ..	83
Figura 44 - Ranking dos potenciais modos de falha do ensaio 4- Metodologia Fuzzy-FMEA ..	83
Figura 45 - Ranking dos cinco potenciais modos de falha críticos - FMEA clássica vs Fuzzy-FMEA.....	84

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Literatura técnica da FMEA ao longo dos anos	8
Tabela 2 - Tipos de FMEA descrito por diferentes autores e normas	10
Tabela 3 - Caracterização do critério de Severidade (Fonte: Adaptado de [43])	15
Tabela 4 - Caracterização do critério de Ocorrência (Fonte: Adaptado de [43])	16
Tabela 5 - Caracterização do critério de Detetabilidade (Fonte: Adaptado de [43]).....	16
Tabela 6 - Exemplo ilustrativo RPN's iguais com diferentes classificações de S, O,D (Fonte: Adaptado de [52])	20
Tabela 7 - Vantagens e desvantagens da metodologia AHP (Fonte: Adaptado de [68])	24
Tabela 8 - Tabela de comparações entre critérios/alternativas - AHP (Fonte: Adaptado de [61])	25
Tabela 9 - RI de Saaty vs RI de Donegan-Dodd (Fonte: Adaptado de [71])	27
Tabela 10 - Vantagens e desvantagem da metodologia TOPSIS (Fonte: Adaptado de [78])	32
Tabela 11 - Estudos de aplicabilidade da metodologia VIKOR (Fonte: Adaptado de [83]).....	35
Tabela 12 - Abordagem clássica vs Abordagem Fuzzy (Fonte: Adaptado de [94]).....	40
Tabela 13 - Tipos de função de pertinência da Lógica Fuzzy (Fonte: Adaptado de [94])	42
Tabela 14 - Operações lógicas - Lógica Fuzzy (Fonte: Adaptado de [94]).....	43
Tabela 15 - Operações matemáticas contextualizadas à Lógica Fuzzy (Fonte: Adaptado de [96])	47
Tabela 16 - Critérios de avaliação da influência de cada elemento do júri (Fonte: Adaptado de [101]).....	57
Tabela 17 - Classificações de Conhecimento Técnico [CT]	58
Tabela 18 - Classificações de Experiência Profissional [EP].....	58
Tabela 19 - Classificações de Expressão Oral/Comunicação [EO-C].....	59
Tabela 20 - Classificações de Grau Académico [GA]	59
Tabela 21-Classificações do critério de Severidade difuso.....	61
Tabela 22 - Classificações do critério de ocorrência difuso.....	62
Tabela 23 - Classificações do critério de Detetabilidade difuso	63
Tabela 24 - Matriz de comparação dos critérios em relação ao objetivo global	69
Tabela 25 - Matriz de comparação dos critérios normalizada (passo intermédio).....	69
Tabela 26 - Matriz de comparação dos critérios normalizada.....	69
Tabela 27 - Vetor de prioridades dos critérios	70
Tabela 28 - Matriz de comparação das alternativas e respetivo vetor de prioridades em relação ao critério de Capacidade de Utilização.....	70
Tabela 29 - Matriz de comparação das alternativas e respetivo vetor de prioridades em relação ao critério de Contribuição para o Lucro	71
Tabela 30 - Matriz de comparação das alternativas e respetivo vetor de prioridades em relação ao critério de Capacidade de Substituição	71
Tabela 31 - Matriz de comparação das alternativas e respetivo vetor de prioridades em relação ao critério de Tecnologia Incorporada	71
Tabela 32 - Matriz de comparação das alternativas e respetivo vetor de prioridades em relação ao critério de Segurança.....	71
Tabela 33 - Pesos das alternativas face ao objetivo global	72
Tabela 34 - Cálculos intermédios para determinar λ_{\max}	73
Tabela 35 - Razão de consistência das alternativas face aos critérios de estudo.....	74
Tabela 36 - Vetor de prioridades dos critérios de avaliação de cada elemento do júri	75

Tabela 37 - Resultados fulcrais da análise da consistência lógica das comparações par-par entre critérios- júri.....	76
Tabela 38 - Matriz de decisão de TOPSIS [D]- elementos do júri.....	76
Tabela 39 - Matriz de decisão normalizada de TOPSIS [R]- elementos do júri	77
Tabela 40-Matriz de decisão ponderada de TOPSIS [V]- elementos do júri	77
Tabela 41 - Distâncias ideal-positiva e ideal-negativa respeitante a cada critério de TOPSIS ...	77
Tabela 42 - Distâncias ao desempenho de cada júri face às anteriores determinadas.....	77
Tabela 43 - Coeficientes de aproximação de TOPSIS- elementos do júri	78
Tabela 44- Exposição dos pesos fulcrais à metodologia proposta Fuzzy-FMEA	78
Tabela 45 - Identificação dos dez potenciais modos de falha mais severos – Metodologia Fuzzy-FMEA.....	79
Tabela 46 - Diferenciação do nível de criticidade pela Fuzzy-FMEA face à FMEA clássica	81
Tabela 47 - Ranking dos potenciais modos de falha mais críticos dos diferentes ensaios - Metodologia Fuzzy-FMEA	83
Tabela 48 - Comparação entre o primeiro potencial modo de falha crítico obtido na FMEA clássica vs Fuzzy-FMEA.....	85
Tabela 49 - Comparação entre o segundo potencial modo de falha crítico obtido na FMEA clássica vs Fuzzy-FMEA	85
Tabela 50 - Comparação entre o terceiro potencial modo de falha crítico obtido na FMEA clássica vs Fuzzy-FMEA	86
Tabela 51 - Comparação entre o quarto potencial modo de falha crítico obtido na FMEA clássica vs Fuzzy-FMEA	86
Tabela 52 - Comparação entre o quinto potencial modo de falha crítico obtido na FMEA clássica vs Fuzzy-FMEA	87

Lista de Abreviaturas, Acrónimos e de Siglas

- AHP** *Analytical Hierarchy Process* (Processo Analítico Hierárquico)
- BOA** *Bisector Of Area* (Bisectriz da Área)
- CdU** Capacidade de Utilização
- CL** Contribuição para o Lucro
- COA** *Centroid Of Area* (Centroíde da Área)
- CS** Capacidade de Substituição
- CT** Conhecimento Técnico
- CTA** Ácido Tereftálico
- D** Detetabilidade
- DEMATEL** *Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory* (Laboratório de Avaliação e de Tomada de Decisão)
- DFMEA** *Design FMEA* (FMEA de Projeto)
- EN** *European Standard* (Norma Europeia)
- EO-C** Expressão Oral/Comunicação
- EP** Experiência Profissional
- EUA** Estados Unidos da América
- FMEA** *Failure Mode and Effects Analysis* (Análise do Modo e Efeitos de Falha)
- FMECA** *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis* (Análise do Modo de Falha, Efeitos e Criticidade)
- FTA** *Fault Tree Analysis* (Análise de Árvore de Falhas)
- F-TOPSIS** Metodologia Fuzzy -TOPSIS
- GA** Grau Académico
- GUI** *Graphical User Interface* (Interface Gráfica do Utilizador)
- HACCP** *Hazard Analysis and Critical Control Point* (Análise de Perigos e Pontos de Controlo Críticos)
- HAZOP** *Hazards And Operability Study* (Estudo de Perigos e Operacionalidade)
- IEC** *International Electrotechnical Commission* (Comissão Eletrotécnica Internacional)
- ISO** *International Organization for Standardization* (Organização Internacional da Normalização)
- LAVM** *Largest Absolute Value Of Maximum* (Maior Valor Absoluto dos Máximos)
- LP** *Linear Programming* (Programação linear)
- MCDM** *Multi-Criteria Decision Making* (Tomada de Decisão Baseada em Multicritérios)

MF	Modo de Falha
MIL-P	<i>Military Procedure</i> (Procedimento Militar)
MIL-STD	<i>Military Standard</i> (Norma Militar)
MVOM	<i>Mean Value Of Maximum</i> (Valor Médio dos Máximos)
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço)
O	Ocorrência
OT	Ordem de Trabalho
PFMEA	<i>Process FMEA</i> (FMEA de Processo)
PTA	Ácido tereftálico purificado
RPN	<i>Risk Priority Number</i> (Número prioritário de risco)
S	Severidade
SAVM	<i>Smallest Absolute Value Of Maximum</i> (Menor Valor Absoluto dos Máximos)
SG	Segurança
SPC	<i>Statistical Process Control</i> (Processo de Controlo Estatístico)
SPS	Sistema Principal do Secador
TI	Tecnologia Incorporada
TOPSIS	<i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i> (Técnica para Ordem de Preferência por Similaridade com a Solução Ideal)
VIKOR	<i>Vlsekriterijuska Optimizacija I Komoromisno Resenje</i> (Solução de Otimização e Compromisso em Multicritérios)

Lista de Símbolos

- [\tilde{D}] Matriz de decisão difusa da Metodologia *F-TOPSIS*
- [\tilde{R}] Matriz de decisão normalizada difusa da Metodologia *F-TOPSIS*
- [\tilde{V}] Matriz de decisão normalizada ponderada difusa da Metodologia *F-TOPSIS*
- [A] Matriz de comparação par-a-par da Metodologia *AHP*
- [D] Matriz de decisão da Metodologia *TOPSIS*
- [F] Matriz de decisão normalizada da Metodologia *VIKOR*
- [I] Matriz identidade
- [N] Matriz de relação direta normalizada da Metodologia *DEMATEL*
- [R] Matriz de decisão normalizada da Metodologia *TOPSIS*
- [T] Matriz de relação total da Metodologia *DEMATEL*
- [V] Matriz de decisão normalizada ponderada da Metodologia *TOPSIS*
- [W] Vetor de pesos dos critérios de desempenho da Metodologia *TOPSIS*
- [X] Matriz de relação direta da Metodologia *DEMATEL*
- {A⁻} Solução ideal negativa da Metodologia *VIKOR*
- {A⁺} Solução ideal positiva da Metodologia *VIKOR*
- A⁻ Solução ideal negativa
- A⁺ Solução ideal positiva
- Cc_i *Closeness coefficient* (Coeficiente de aproximação da Metodologia *TOPSIS/F-TOPSIS*)
- D_i Influência direta da Metodologia *DEMATEL*
- FNPI** *Fuzzy Negative-Ideal Solution* (Solução ideal difusa negativa da Metodologia *F-TOPSIS*)
- FPIS** *Fuzzy Positive-Ideal Solution* (Solução ideal difusa positiva da Metodologia *F-TOPSIS*)
- CI *Consistency Index* (Índice de consistência da Metodologia *AHP*)
- RI *Randomic Index* (Índice aleatório da Metodologia *AHP*)
- Max** Máximo
- Min** Mínimo
- Q_i Índice de *VIKOR* da Metodologia *VIKOR*
- CR *Consistency Ratio* (Razão de consistência da Metodologia *AHP*)
- R_i Influência indireta da Metodologia *DEMATEL*
- R_i Fator de medida menos favorável da Metodologia *VIKOR*
- S_i Fator de medida favorável da Metodologia *VIKOR*

Lista de funções *Matlab*

Função	Definição
[; ;]	Construção de uma matriz de n linhas por m colunas.
[;]	Construção de um vetor coluna.
[]	Construção de um vetor linha.
cell2mat	Função que permite que células de estrutura <i>array</i> se transformem numa matriz de dimensão equivalente.
cell-array	Cria uma célula de estrutura de armazenamento do tipo <i>array</i> .
Command Window	A janela de comando permite que seja inserido instruções individuais na linha de comando e de visualizar os resultados gerados.
disp	Função que apresenta o valor alfanumérico de uma variável de comando.
for; end	Função que executa um grupo de instruções em <i>loop</i> especificamente para um número de vezes indicado pelo utilizador.
if;elseif; else;end	Função de avaliação da expressão que executa um grupo de instruções consoante a veracidade da imposição.
input	Função de entrada de dados alfanuméricos provindos do utilizador.
load	Função de carregar dados a definir pelo utilizador.
mat2cell	Função que permite converter matriz em estruturas de célula do tipo <i>array</i> .
max	Função que devolve o valor máximo de um dado conjunto numérico.
min	Função que devolve o valor mínimo de um dado conjunto numérico.
norm	Função que devolve a norma euclidiana de um dado vetor/matriz.
num2str	Função que converte um <i>array</i> numérico de um elemento que represente o número em <i>string</i> .
questdlg	Função de construção de uma caixa de diálogo.
save	Função de guardar o documento e seus dados em memória. Existe a opção de guardar uma variável em específico.
saveas	Função de guardar uma figura no formato específico de imagem e nome a definir pelo utilizador.
size	Função que indica o tamanho de um vetor/matriz.
sortrows	Função de classificar/ordenar as linhas de uma matriz ou de uma tabela (crescente/descente).
sqrt	Função que devolve a raiz quadrada de uma variável numérica de comando.
strcmp	Função que permite comparar a <i>string 1</i> à <i>string 2</i> , devolvendo a condição “verdadeira” se forem idênticas, caso contrário são falsas.
string	Função de representação dos elementos de texto com caracteres alfanuméricos.

- sum*** Função de somatório de um conjunto de elementos podendo ser somatório em coluna, linha ou de ambos.
- table*** Construção de uma tabela consoante os *input's* de linhas e colunas.
- while*** Função que avalia a expressão e repete a execução de um grupo de instruções em *loop while* se a condição da expressão for verdadeira.
- zeros(nxm)*** Construção de uma matriz de zeros de n linhas por m colunas.

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A manutenção tem um papel de enorme complexidade dada a sua importância, contudo, por entre definições, caracteriza-se pela garantia de manter a funcionalidade do equipamento ao fim destinado, bem como de preservar e proteger o ambiente que o rodeia [1]. Destaca-se pelo compromisso entre a operacionalidade dos equipamentos com as metas de produção, garantindo o cumprimento das especificações de produto atendendo aos padrões de qualidade definidos. Pariazar *et al.* [2] estimam que tais garantias acarretam 15% a 70% do orçamento anual. Apesar do intervalo ser grande, este demonstra a dependência das organizações, que de certa forma apresentam baixos ou elevados custos de manutenção. No gráfico da Figura 1 é apresentado uma evolução de custos em virtude da política de manutenção adotada.



Figura 1 - Relação no sector Manutenção entre custo vs disponibilidade do sistema
(Fonte: Adaptado de [1])

No cenário à esquerda no gráfico da Figura 1, baseado numa política de manutenção deficiente, verifica-se uma redução de custos de manutenção. Contudo, os custos inerentes à produção aumentam drasticamente devido aos maiores tempos de paragem dos equipamentos e, como consequência, há um aumento do número de inconformidades nos produtos e incumprimento dos prazos de entrega, criando fortes penalidades nos contratos adjudicados. No cenário à direita no gráfico da Figura 1, aplica-se uma política de manutenção excessiva. Eventualmente com esta política, apesar de aumentar em alguns casos a disponibilidade do equipamento, os custos das ações de manutenção tornam a operação economicamente inviável.

Um compromisso entre ambos cenários só é possível à custa da inclusão de inúmeros critérios que garantam a harmonia de todas as exigências afetas aos sectores de uma organização na estratégia de manutenção. Segundo a literatura [3,4] são apresentados alguns dos critérios que devem ser considerados no sucesso da gestão e planeamento da manutenção, tal como se pode evidenciar no esquema da Figura 2.



Figura 2 - Critérios-chave de sucesso à gestão da manutenção

Complementado o raciocínio anterior, Pariazar *et al.* [2] reconhecem outros critérios fulcrais em paralelo de uma boa gestão da manutenção, entre os quais:

- Qualidade no serviço/produto;
- Satisfação do cliente;
- Nível de risco;
- Qualificação da equipa de manutenção;
- Produtividade;
- Fiabilidade/Disponibilidade/Segurança dos ativos físicos e pessoas.

Atendendo aos critérios acima descritos, é importante utilizar metodologias analíticas robustas, entre elas a *Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)*. A metodologia *FMEA* permite analisar e explorar a tipologia dos demais potenciais modos e efeitos de falha que possam ocorrer num dado ativo físico [5]. Ao longo dos anos, esta ferramenta foi muitas vezes criticada pela comunidade científica, originando um especial

interesse em englobar na mesma análise outras ferramentas que a complementem, com o intuito de priorizar os potenciais modos de falha num determinado ativo físico.

Dada a realidade vivida pelas organizações em matéria de recursos humanos e tecnológicos, nomeadamente na alocação de meios de combate aos potenciais modos de falha com maior nível de risco, segundo Pariazar *et al.* [2], tipificam-se cinco tipos de ações de manutenção, entre as quais se destacam as seguintes definições:

- **Manutenção corretiva:** estratégia de manutenção focada no desencadear de ações após ocorrer a falha. Esta estratégia remota ao conceito original da manutenção no sector industrial, porém devido aos perigos potenciais para os ativos, pessoas e ambiente envolvente, esta ação de manutenção sofreu reformas importantes ao longo do tempo obrigando os engenheiros/gestores de manutenção a adotarem estratégias mais seguras e eficientes.
- **Manutenção preventiva sistemática:** estratégia de manutenção focada na fiabilidade intrínseca do componente/sistema. Através desta estratégia é possível delinear um programa de manutenção ao equipamento no qual as intervenções de manutenção são realizadas após terem sido atingidas certas horas de funcionamento, ou outro tipo de medição, tal como o número de quilómetros percorridos, ciclos de funcionamento, rotações por minuto, entre outras.
- **Manutenção baseada na oportunidade:** estratégia de manutenção focada no sentido de aproveitar a oportunidade dos tempos de paragens dos equipamentos ou até de linhas de produção para que sejam desencadeados os pequenos trabalhos de manutenção de categoria menos urgente. A desvantagem principal reside na dificuldade em implementar tal estratégia devido à particularidade de requerer uma coordenação rigorosa e de suporte às equipas de manutenção.
- **Manutenção por controlo de condição:** estratégia de manutenção baseada na condição. Existe um número significativo de técnicas disponíveis, tais como a análise de vibrações, a análise de óleos e a termografia, entre outras, a fim de medir certos parâmetros do equipamento. Se os dados inferirem ao correto funcionamento não é necessário intervir, caso contrário, serão desencadeadas ações de manutenção. Apresenta limitações, nomeadamente na falta de precisão por parte de alguns equipamentos de medida como também no ruído de sinal resultante das condições de funcionamento onde o equipamento opera que influenciam a leitura dos parâmetros, induzindo a erro.

- Manutenção preditiva: estratégia de manutenção baseada no controlo de parâmetros do equipamento. Tem o intuito de estabelecer um período temporal para que seja realizada a intervenção de manutenção. Dependendo de inúmeros fatores poderá ser planeada a manutenção ao equipamento ou em último caso a substituição de certo item.

1.2. Objetivos

Os objetivos da presente dissertação são enumerados por ordem crescente de desafio proposto.

- Realizar uma revisão do estado de arte com o propósito de determinar as limitações da *FMEA*;
- Analisar soluções propostas por diversos investigadores da área que apliquem a *FMEA* a outras ferramentas, em concreto, ferramentas no domínio da tomada de decisão baseada em multicritérios (*MCDM*);
- Explorar as metodologias *Analytic Hierarchy Process (AHP)* e *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)* em conjunto com a lógica *Fuzzy* a fim de quantificar a incerteza por parte das equipas técnicas aquando da avaliação de riscos de cada potencial modo de falha do equipamento em análise;
- Estabelecer uma sinergia entre a metodologia *FMEA* e as metodologias anteriores descritas de modo a propor uma nova metodologia;
- Aplicação da metodologia proposta a um caso de estudo e realização de estudos para corroborar o comportamento robusto da mesma.

1.3. Motivação

A motivação da presente dissertação surge em criar uma metodologia que englobe o *know-how* dos demais colaboradores que operam com os equipamentos e o conhecimento da engenharia, permitindo tratar a informação procedente de diversas fontes e aplicá-la na avaliação de risco e priorização dos potenciais modos de falha e estudo dos seus efeitos, de modo a que sejam estabelecidas ações de carácter resolutivo que reduzam os riscos de tais potenciais modos ou que os eliminem na sua totalidade.

1.4. Estrutura do trabalho

A presente dissertação apresenta-se dividida em sete capítulos, desde o enquadramento do tema à atividade de manutenção e demonstração da metodologia proposta num caso prático, terminando com as conclusões alusivas ao tema explorado.

O capítulo 2 visa apresentar uma abrangência global em termos definitivos da metodologia *FMEA*, como também um pequeno resumo histórico da mesma. Neste capítulo, serão discutidas as diferenças entre *FMEA* e *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA)* em termos categóricos e definidos os três critérios base da avaliação de risco. Serão aqui ainda descritos os benefícios bem como as limitações da ferramenta em estudo.

O capítulo 3 visa explorar algumas ferramentas de tomada de decisão baseadas em multicritérios para compreender as potencialidades das mesmas na medida de colmatar certas limitações da *FMEA* na avaliação do risco.

O capítulo 4 objetiva detalhar a metodologia *TOPSIS* contextualizada à lógica *Fuzzy*, enumerar as definições da mesma como também expor o algoritmo da metodologia que engloba a lógica *Fuzzy* e a metodologia *TOPSIS*.

No capítulo 5, apresenta-se uma metodologia explicando as variáveis de decisão e algoritmos propostos, assim como os argumentos de suporte à implementação numa *Fuzzy-FMEA*.

No capítulo 6 será aplicada a metodologia proposta a um caso de estudo prático, não só com o intuito de corroborar a metodologia proposta, como também de realizar estudos de comparação da priorização do nível de risco entre a metodologia proposta e a *FMEA* clássica. Por último, no capítulo 7 serão apresentadas as conclusões da presente dissertação bem com as propostas de trabalhos futuros nesta área de estudo.

2. Metodologia *FMEA*

2.1. Definição e objetivos

A *FMEA* clássica expressa-se como uma análise dos modos e efeitos de falhas que possa ocorrer num dado ativo físico [1]. Trata-se de uma metodologia de análise de cada potencial modo de falha a fim de determinar os efeitos consequentes no sistema em estudo com objetivo de classificar cada um individualmente [6,7].

A norma *IEC 60812* [8] distingue a *FMEA* de *FMECA*, acrescentando à última a análise da criticidade de cada potencial modo de falha, permitindo assim priorizar os demais potenciais modos de falha do sistema de acordo com o seu nível risco¹. O risco de cada potencial modo de falha resulta do cálculo do *Risk Priority Number (RPN)*, o qual é obtido pelo produto algébrico da classificação obtida de três critérios [9–13]:

- Critério de Severidade (S);
- Critério de Ocorrência (O);
- Critério de Detetabilidade (D).

Indo ao encontro do parágrafo anterior, surge a seguinte questão.

“Qual o interesse em determinar os eventos de maior risco?”

A fim de responder à questão, é importante ter em conta qual o papel destas ferramentas no sector da manutenção. Segundo Carpitella *et al.* [14] e Certa *et al.* [15] as dificuldades essenciais sentidas no planeamento da manutenção prendem-se com a capacidade de selecionar os elementos de maior importância de um sistema, que não só comprometam a integridade do sistema em estudo como a segurança dos envolvidos.

Numa perspetiva técnico-económica, avaliando todos os fatores de interesse na tomada de decisão em desencadear certas ações, por vezes a pressão e o peso de determinados critérios fazem com que sejam adiadas certas ações de carácter preventivo levando a um desgaste prematuro de certos elementos, e, em última instância, ao colapso do sistema.

Em casos extremos, o acumular de falhas e o desencadear de ações negligentes poderão tomar dimensões catastróficas. Tomando como exemplo o acidente numa *offshore* da *BP* no Golfo do México em 2010, Walker [16] enumera alguns prejuízos, entre os quais as enormes perdas económicas resultantes das penalidades e gastos

¹ **Consideração do autor:** Neste subcapítulo, o autor do presente trabalho considera que a ferramenta *FMEA* e a *FMECA* têm o mesmo valor em termos categóricos, havendo um estudo descritivo desta distinção de *FMEA* e *FMECA* no subcapítulo 2.4. Por uma questão de coerência será designada de *FMEA*.

operacionais nas intervenções de resgate e limpeza dos danos ambientais, como também, o enorme impacto socioambiental que levou à morte em massa de flora vegetal, animal e à transformação de ecossistemas. O impacto global foi tão severo que quase após uma década ainda são sentidos os efeitos do desastre, nas populações mais próximas.

Analisando este desastre, entre muitos outros que têm surgido ao longo da história da humanidade, é imperativo a melhoria de métodos analíticos fiáveis que permitam dar certas respostas expeditas e robustas na hora de tomada de decisão. Desta forma, a norma *IEC 60812* [8] enfatiza alguns argumentos e objetivos que validam a implementação da *FMEA*, os quais se expõem no quadro da Figura 3 [17].

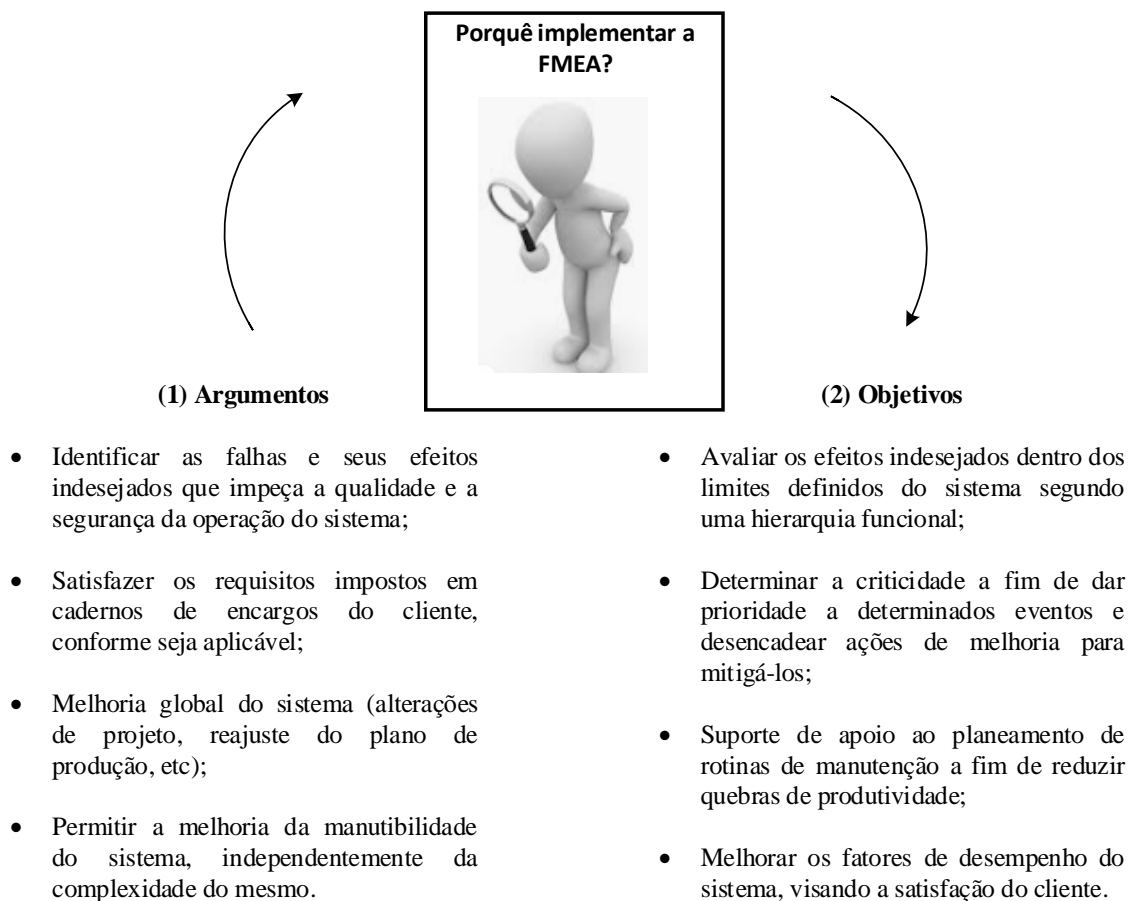


Figura 3 - Quadro síntese dos argumentos e objetivos da implementação FMEA

2.2. Breve resumo histórico e setores de desenvolvimento da FMEA

O desenvolvimento desta ferramenta remota a 1949 pelo exército dos Estados Unidos da América (EUA) com o intuito de estudar os problemas resultantes do incorreto manuseio dos equipamentos militares [18]. Em 1963, a *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* realizou estudos de aplicabilidade da FMEA [19], até que John S. Coutinho (diretor do departamento de Fiabilidade - *Missão Apollo*) publica um trabalho intitulado de “*Failure-effect analysis*” [20]. A partir da sua criação, fabricantes de automóveis adotaram a FMEA em trabalhos, destacando a *Chrysler Corporation*, *Ford Motor Company* e *General Motors Company*. Em paralelo, o procedimento da FMEA tem sido alvo de estudo de diversos investigadores, tal como se podem evidenciar através de alguns dos desenvolvimentos até à atualidade presentes na Tabela 1.

Tabela 1 - Literatura técnica da FMEA ao longo dos anos

Objetivo	Ferramenta/Tema	Referências
Combinação com outras metodologias	<i>FMEA-QFD</i>	Bosch <i>et al.</i> [21] Hassan <i>et al.</i> [22]; Tanik [23]
	<i>FMEA-SPC</i>	Teng and Ho [24]
	<i>FMEA-HACCP</i>	Bertolini <i>et al.</i> [25] Arvanitoyannis <i>et al.</i> [26]
	<i>FMEA- KANO METHOD</i>	Shahin [27]
	<i>FMEA- TRIZ METHOD</i>	Bariani <i>et al.</i> [28]
	<i>FMEA- HAZOP</i>	Ilangkumaran and Tamizhselvan [29]
	<i>FMEA-Service Blue Printing</i>	Chang and Sun [30]
Modificação da FMEA	<i>Holistically - oriented FMEA</i>	Devadasan [31]
	<i>Reliability assessment of product re-manufacture</i>	Parkison <i>et al.</i> [32]
	<i>Reliability assessment of lean manufacturing system/business process</i>	Sawhney <i>et al.</i> [33] Zakarian <i>et al.</i> [34]
	<i>Behaviour Modelling</i>	Eubanks <i>et al.</i> [35]
	<i>Petri Net</i>	Adamyam and He [36]
	<i>FMEA-Automation</i>	Tso <i>et al.</i> [37]

Dados os desenvolvimentos acima expostos, a expansão da ferramenta aos demais setores da sociedade permite inferir que a FMEA é uma ferramenta robusta, capaz de realizar uma análise de dados de uma forma bastante prática [38], promovendo assim a melhoria contínua nos demais processos, tal como se evidencia no gráfico da Figura 4.

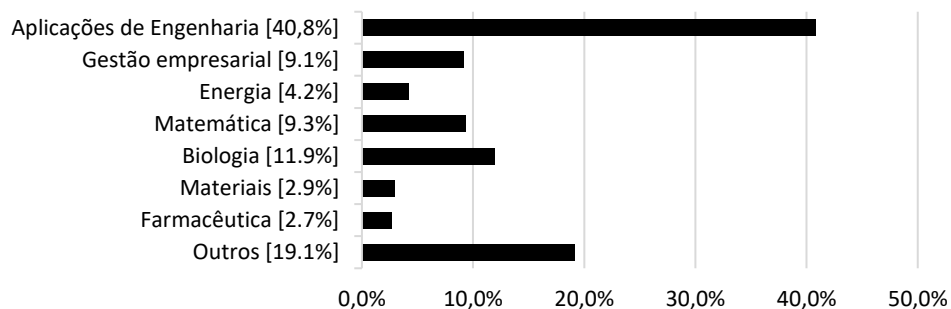


Figura 4 - Aplicabilidade da FMEA nos demais setores de interesse social
(Fonte: Adaptado de [39])

Analisando o gráfico da Figura 4, destaca-se que esta ferramenta continua predominantemente a ser empregue na área da Engenharia [39]. Esta ferramenta deverá ser utilizada por uma equipa de trabalho, na qual a mesma deverá realizar sessões do tipo *brainstorming* para englobar os problemas provenientes dos demais departamentos envolventes. Numa fase primordial, um diagrama de *Ishikawa*, poderá ser uma boa solução para iniciar os estudos com maior grau de complexidade no sistema [40], tal como se observa na Figura 5 através de um exemplo prático muito simples.

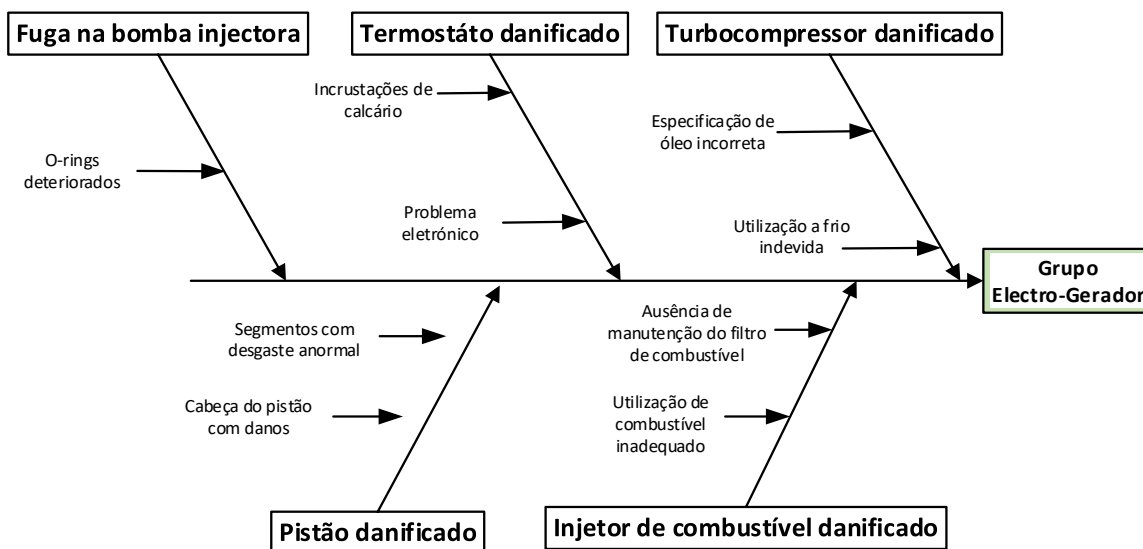


Figura 5 - Exemplo de um diagrama de Ishikawa contextualizado à FMEA

2.3. Tipos de FMEA

A ferramenta *FMEA* tipifica-se em diferentes subtipos, dada a necessidade de se ajustar aos fins propostos. Analisando os desenvolvimentos de alguns autores ao longo do tempo, é notória a divergência nesta matéria.

Os tipos de *FMEA* são caracterizados com diferentes graus de especificidade, tal como se pode observar na Tabela 2.

Tabela 2 - Tipos de FMEA descrito por diferentes autores e normas

Ano	Autores/Normas	Tipos de FMEA
1980, 2002	MIL-STD-1629A [6], Puente <i>et al.</i> [19]	<i>DFMEA</i> <i>PFMEA</i>
2003	Stamatis, D.H. [41]	<i>System-FMEA</i> <i>DFMEA</i> <i>Product and Development-FMEA</i> <i>PFMEA</i> <i>Service-FMEA</i>
2011	Lipol <i>et al.</i> [5]	<i>System-FMEA</i> <i>DFMEA</i> <i>PFMEA</i> <i>Service-FMEA</i>
2013	Gulati, Ramesh [1]	<i>DFMEA</i> <i>PFMEA</i> <i>Maintenance-FMEA</i> <i>Service-FMEA</i> <i>Software-FMEA</i>

Analisando a Tabela 2, observa-se que os autores subdividiram os tipos de *FMEA* em maneiras distintas, a fim de enfatizar certos pormenores em detrimento de outros.

Na presente dissertação a *FMEA* é diferenciada em *Design FMEA (DFMEA)* e *Process FMEA (PFMEA)*.

2.3.1. DFMEA

Design FMEA ou *FMEA* de Projeto (*DFMEA*) trata-se de uma análise cujo objetivo principal reside em identificar e reconhecer os potenciais modos/efeitos de falha na fase de projeto [6,41].

Segundo Stamatis & Schneider [42], a *DFMEA* é acompanhada de uma série de análises iterativas que englobam componentes, subsistemas e sistemas. Consiste num processo dinâmico de análise na qual envolvem *softwares* de simulação entre outras ferramentas, que permitem prever o comportamento dos sistemas sobre dadas condições e dadas mudanças nos componentes, como também analisar os vários processos de fabrico que poderão ser empregues e quais as consequências deles resultantes. A título demonstrativo, uma tecnologia de fabrico que origine um acabamento de superfície com grau de rugosidade elevado, caso seja colocada num par tribológico onde haja atrito, originará conseqüente um desgaste pronunciado.

Pode definir-se a *DFMEA* como uma pré-análise prevendo os potenciais modos de falha prematuras, tendo em conta as considerações abaixo descritas [5,42,43]:

- Transformar a necessidade operacional numa parametrização de desempenho do sistema o mais completo possível, usando processos de análise funcional, otimização e revisão de projeto exaustivos;
- Integrar parâmetros técnicos que permitam garantir a compatibilidade de todas as interfaces físicas e funcionais permitindo otimizar o projeto de todo o sistema;
- Otimizar os parâmetros de fiabilidade, manutibilidade, produtividade e segurança estrutural e dos intervenientes que rodeiam o sistema em estudo.

Desta forma, a *DFMEA* visa responder às seguintes questões [42,43]:

- Qual a funcionalidade dos produtos e quais os fins pretendidos?
- Como executa a sua função?
- Quais os materiais e componentes empregues para a construção do sistema?
- Quais as condições de funcionamento que o produto faz comparativamente em outros produtos?
- Quais são os produtos resultantes do funcionamento do sistema?
- Como o sistema será abatido?
- Quais são os processos de fabrico?
- Quem serão os operadores alvo e a que riscos ficarão sujeitos?

2.3.2. PFMEA

Process FMEA ou *FMEA de Processo (PFMEA)* trata-se de uma análise cujo objetivo principal incide em identificar e reconhecer os potenciais modos/efeitos de falha, com intuito de providenciar ações que permitam mitigar os potenciais modos de falhas e/ou que minimizem os efeitos resultantes da falha. A *PFMEA* é acompanhada de uma série de análises iterativas as quais incluem as considerações do sistema global (tempo de produção, equipamento, método de fabrico, material, meio ambiente, entre outras) que visam que o produto final seja isento de inconformidades.

Tipicamente, existem dois tipos de análise numa *PFMEA*:

- Análise de capacidade do processo: infere a capacidade inerente de certos componentes da produção. A título demonstrativo, Stamatís & Schneider [42] justificam que esta análise permite estudar a capacidade de uma máquina satisfazer as previsões potenciais de capacidade produtiva a curto prazo e a longo prazo;
- Avaliação do problema: dada a dificuldade de avaliar todos os parâmetros de um processo, a organização estabelece um conjunto de parâmetros que sejam fulcrais para o bom funcionamento produtivo. Esta avaliação poderá ser orientada por requisitos impostos no caderno de encargos do cliente, legislação governamental, recomendações do departamento de engenharia e normas industriais, entre outras diretrizes que permitam parametrizar o processo.

A *PFMEA* apresenta a particularidade de se poder criar um fluxo de iterações que só terminam quando o *RPN* é suficientemente baixo (a título demonstrativo, menor que 50 se se usar uma escala quantitativa para os demais critérios de 1 a 10 [6]).²

Contextualizando na teoria desenvolvida por Reason referente ao Queijo Suíço [44,45] é benéfico numa organização que as equipas da Manutenção trabalhem em harmonia com as equipas de Projeto/Produção com intuito de criar mecanismos de proteção dos componentes - subsistemas, subsistema - sistema global, para que possam evitar o acidente agregado.

² **Consideração do autor:** as escalas quantitativas de avaliação dos critérios serão apresentadas no subcapítulo seguinte.

A teoria do Queijo Suíço (Figura 6) fortalece o conceito de que numa análise de risco, cada orifício de uma fatia representa uma falha e caso essa falha se propague para a seguinte barreira de segurança poderá originar um acidente de dimensão catastrófica.

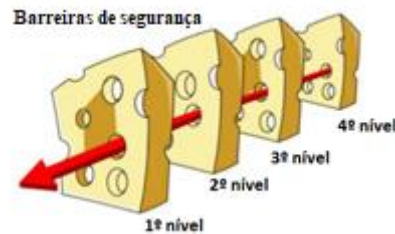


Figura 6 - Modelo do queijo suíço de James Reason
(Fonte: Adaptado de [44])

2.4. Dissemelhanças entre FMEA-FMECA

2.4.1. Considerações

O tema do presente subcapítulo gera alguma controvérsia na comunidade científica. Tal controvérsia surgiu desde a criação das primeiras normas militares, destacando a MIL-STD-1629 [6], que define a *FMEA* como:

“Um procedimento no qual cada potencial modo de falha do sistema é analisado para determinar os resultados ou efeitos no próprio sistema ...”

Analisando a definição acima exposta, deduz-se que haja um estudo da severidade dos potenciais efeitos provenientes das falhas para que à *posteriori* sejam priorizados os potenciais modos de falha e desencadeadas as ações que permitam mitigar os mesmos.

Posteriormente, para despistar a controvérsia de definições, a norma *IEC 60812* [8] propõe a resposta a uma questão muito simples, tal como se pode observar no esquema abaixo proposto (Figura 7).

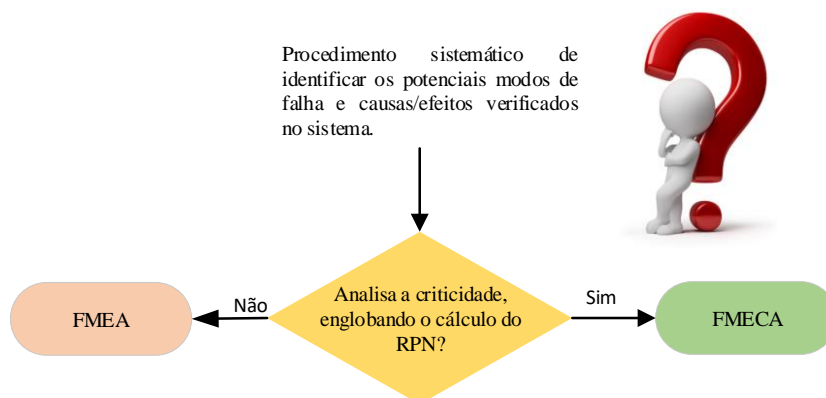


Figura 7- Distinção da FMEA vs FMECA segundo a norma IEC 60812

Na comunidade científica as opiniões divergem pelo mesmo problema exposto nas normas. A primeira abordagem considera que todo o processo, desde a análise dos potenciais modos de falha e seus efeitos até à avaliação da criticidade por intermédio do cálculo do *RPN*, pertence às metodologias propostas pela *FMEA* [13,46,47], não existindo o conceito de *FMECA*, dado estar englobado na *FMEA*.

A segunda abordagem que distingue *FMEA* de *FMECA*, considera que a *FMECA* é composta por duas iterações [5,48]:

- Construção da *FMEA* onde são analisados os potenciais modos de falha e seus efeitos, individualmente;
- Determinação da criticidade de cada potencial modo de falha, efetuando o cálculo do *RPN*. Após o cálculo individual do *RPN*, constrói-se um *ranking* de criticidade a fim de priorizar os potenciais modos de falha mais severos, para que sejam desencadeadas ações de carácter interventivo para diminuir o nível de *RPN*, ou idealmente, que sejam colmatados.

Tendo em conta as demais abordagens que a comunidade científica propõe nesta ferramenta, será considerado neste trabalho uma definição de carácter universal, ou seja, a ferramenta é considerada exclusivamente como *FMEA*. Considera-se que as diferenças propostas pelos autores da literatura científica não justificam a necessidade de considerar uma distinção severa entre as ferramentas dado considerar que o objetivo da *FMEA/FMECA* é que, de uma forma geral, sejam eliminados ou minimizados os potenciais modos de falha com maior risco para que sejam melhoradas as métricas de desempenho destacando incrementos de produtividade, aumento da vida útil dos equipamentos, melhoria da segurança e bem-estar dos colaboradores, entre outras.

2.4.2. Determinação da criticidade

A determinação da criticidade é feita por intermédio do cálculo do *RPN*, cuja fórmula é dada pela expressão (1).

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

Onde:

- *S* expressa o critério de Severidade, quantificado de 1 a 10 (Tabela 3);
- *O* expressa o critério de Ocorrência, quantificado de 1 a 10 (Tabela 4);
- *D* expressa o critério de Detetabilidade, quantificado de 1 a 10 (Tabela 5).

- Severidade (*S*): consiste na quantificação do efeito do potencial modo de falha em estudo para o subsistema, sistema, entre outros [49]. É um critério que se foca exclusivamente na análise do efeito, sendo a atenuação do mesmo feita à custa de melhorias de projeto [50]. A quantidade de níveis da escala de severidade pode variar, apresentando-se de seguida uma escala de 1 a 10 (por exemplo aplicável no setor automóvel), onde o nível 1 corresponde à situação mais favorável e o nível 10 corresponde à situação menos favorável, tal como se pode observar na Tabela 3.

*Tabela 3 - Caracterização do critério de Severidade
(Fonte: Adaptado de [43])*

Efeito	Critério de Severidade [S]	Índice de severidade
Muito perigoso	A falha é muito perigosa e sem aviso, punível por regulamentos organizacionais e governamentais	10
Perigoso	A falha é perigosa, punível por regulamentos organizacionais e governamentais	9
Extremo	O desempenho do produto/sistema encontra-se bastante afetado, estando inoperável	8
Maior	O desempenho do produto/sistema é severamente afetado, mas ainda funciona. Algumas funções básicas poderão funcionar	7
Significante	O desempenho do produto/sistema encontra-se alterado	6
Moderado	Efeito moderado no produto/sistema. Necessita de reparação	5
Baixo	Pequeno efeito no produto/sistema. Não necessita de reparação	4
Pequeno	Efeito diminuto/sentido no produto/sistema	3
Muito pequeno	Efeito muito diminuto no produto/sistema	2
Nenhum	Sem efeito no produto/sistema	1

- Ocorrência (*O*): consiste na probabilidade de um mecanismo/causa específica vir a acontecer.

A probabilidade da ocorrência tem um significado superior ao de meramente indicar a sua ocorrência. Permite verificar qual a periodicidade do evento, possibilitando estabelecer alterações de projeto que visem a diminuição ou idealmente a sua eliminação [50]. A escala de ocorrência é análoga à escala da severidade, tal como se observa na Tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização do critério de Ocorrência
(Fonte: Adaptado de [43])

Probabilidade de falha	Critério de Ocorrência (incidências anuais) [O]		Índice de ocorrência
Muito alta	Falha é inevitável	≥ 1 em 2	10
Alta III	Falha repetida	1 em 3	9
Alta II		1 em 8	8
Alta I		1 em 20	7
Moderada III	Falha ocasional	1 em 80	6
Moderada II		1 em 400	5
Moderada I		1 em 2000	4
Pequena II	Algumas falhas	1 em 15 000	3
Pequena I	Muitas poucas falhas	1 em 1 500 000	2
Muita pequena	Falha remota	≤ 1 em 1 500 000	1

- Detetabilidade (*D*): consiste na capacidade em identificar o mecanismo causador da falha subsequente [50]. Para melhorar a detetabilidade, deverão ser otimizadas as técnicas de controlo, quer numa fase inicial pelo controlo de qualidade, quer numa fase de funcionamento por intermédio das técnicas de controlo de condição, entre outras.

A caracterização do critério de Detetabilidade é exposta na Tabela 5.

Tabela 5 - Caracterização do critério de Detetabilidade
(Fonte: Adaptado de [43])

Capacidade de deteção	Critério de Detetabilidade [D]	Índice de detetabilidade
Nenhuma	Não é possível detetar a causa/mecanismo de falha	10
Rara I	Rara chance de deteção da causa /mecanismo de falha	9
Rara II		8
Baixa I	Baixa chance de deteção da causa/mecanismo de falha	7
Baixa II		6
Alguma	Alguma chance de deteção da causa/mecanismo de falha	5
Moderada	Moderada chance de deteção da causa/mecanismo de falha	4
Alta	Elevada chance de deteção da causa/mecanismo de falha	3
Muita alta	Muita elevada chance de deteção da causa/mecanismo de falha	2
Certa	A deteção da causa potencial/mecanismo de falha é certa	1

Certamente que para se utilizar a metodologia *FMEA* como uma ferramenta robusta é necessário ter em conta algumas diretrizes para se proceder à elaboração da mesma.

Pillay & Wang [17] e Puente *et al.* [19] enumeram algumas boas práticas de como elaborar uma *FMEA*:

1º passo: Desenvolver um plano técnico, descrevendo o que o sistema deverá fazer quando se encontra no seu funcionamento correto;

2º passo: Descaracterizar o sistema em subsistemas até aos componentes;

3º passo: Utilizar esquemas, diagramas de blocos e fluxogramas para identificar os componentes e criar relações de dependência entre os mesmos;

4º passo: Desenvolver uma lista de componentes em cada subsistema;

5º passo: Identificar contextos severos de operação que possam afetar o sistema. Correlacionar tal afetação ao sistema à forma como pode afetar cada componente;

6º passo: Determinar os potenciais modos de falha de cada componente e seus efeitos de falha, e como tais potenciais modos poderão influenciar o funcionamento dos subsistemas e do sistema global;

7º passo: Quantificar o critério de Severidade para cada potencial modo de falha;

8º passo: Quantificar o critério de Ocorrência para cada potencial modo de falha;

9º passo: Quantificar o critério de Detetabilidade para cada potencial modo de falha;

10º passo: Calcular a criticidade do potencial modo de falha, através do cálculo do *RPN*;

11º passo: Priorizar os potenciais modos de falha segundo a sua criticidade;

12º passo: Desenvolver ações para mitigar o problema. Poderão ser enquadradas em duas categorias:

- Ações preventivas, mitigando as situações de falha;
- Ações corretivas, minimizando as perdas resultantes da ocorrência de falha.

Em suma, expõe-se um fluxograma para clarificar os tópicos anteriormente descritos, evidenciado na Figura 8.

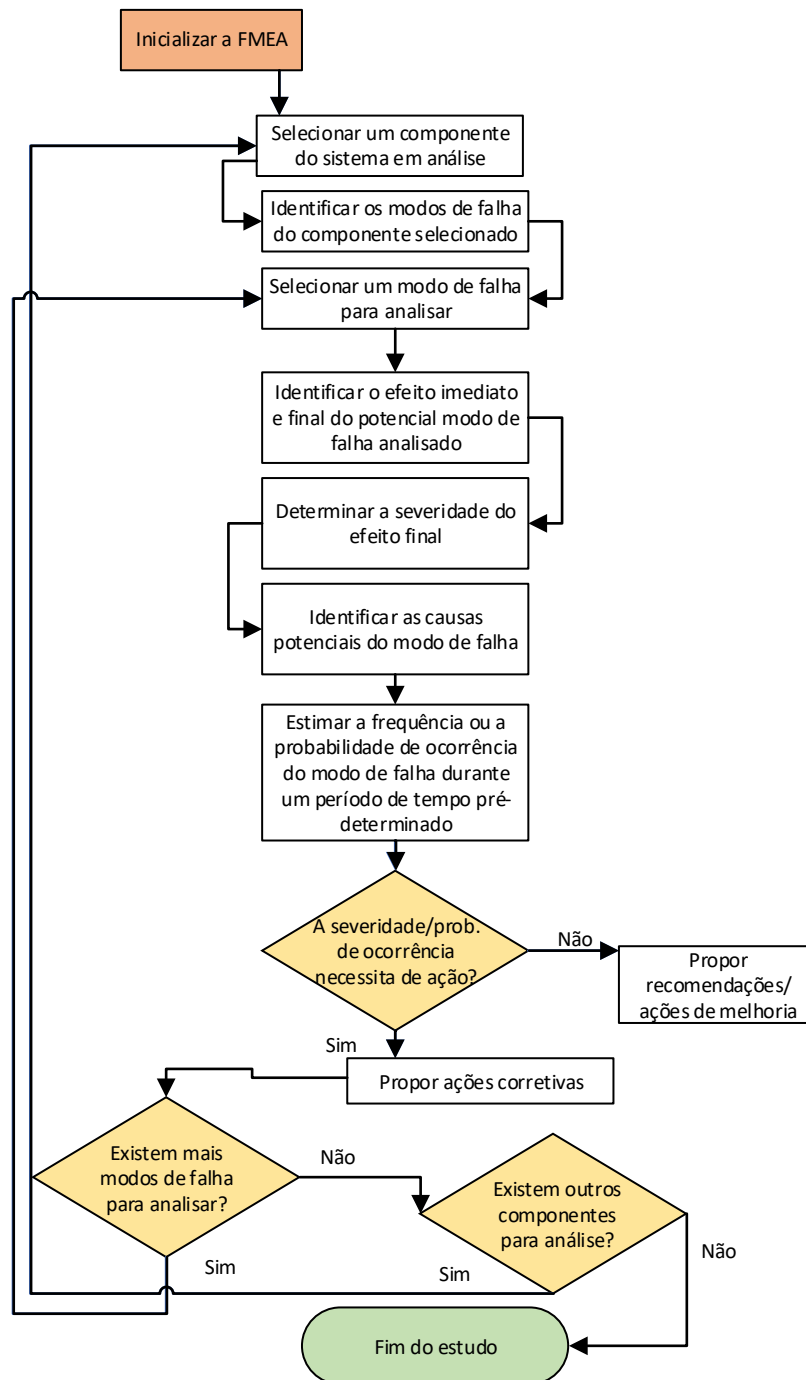


Figura 8 - Fluxograma de implementação de uma FMEA
(Fonte: Adaptado de [51])

No Anexo I da presente dissertação, evidencia-se um pequeno guia de como elaborar corretamente uma *FMEA*, destacando as informações de relevo que devem ser devidamente preenchidas, baseado no trabalho de Puente *et al.* [19] e de Moura [50].

2.5. Críticas à FMEA

2.5.1. Críticas benéficas

Segundo Lipol & Haq [52] existem algumas vantagens na aplicação da *FMEA*, destacando as seguintes:

- Identifica os potenciais modos de falha a fim de eliminar as suas causas, se possível;
- Avalia o risco associado aos respetivos potenciais modos de falha e prioriza os mesmos de modo a que sejam feitas ações corretivas, a fim de reduzir a frequência e a severidade dos mesmos;

Tais vantagens operacionais de desempenho da *FMEA* integram um leque de contributos, tais como os que se podem observar no esquema da Figura 9.

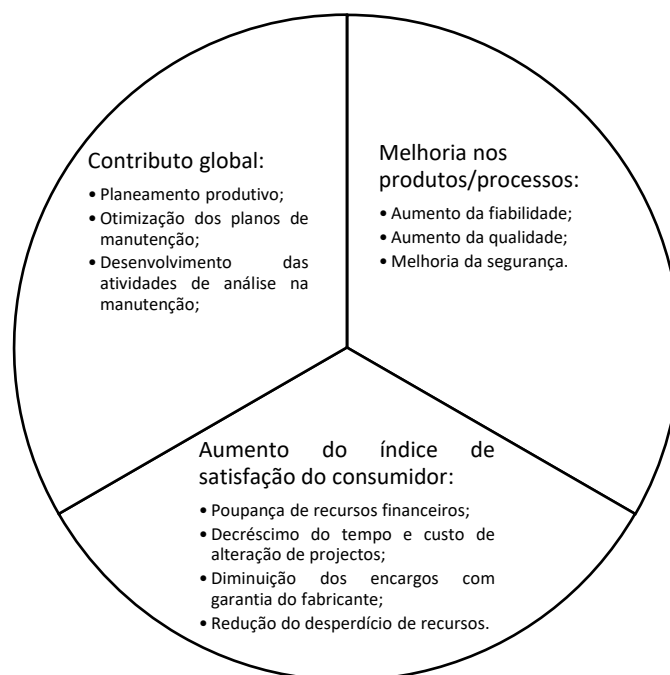


Figura 9 - Contributos da FMEA - síntese global
(Fonte: Adaptado de [52])

2.5.2. Críticas de limitação

Apesar da *FMEA* ser uma ferramenta bastante robusta, apresenta algumas limitações à sua aplicação. Desta forma, analisando as dificuldades de alguns autores da presente literatura, é possível enumerar as seguintes limitações:

- (1) Os critérios de Severidade, Ocorrência e Detetabilidade apresentam o mesmo peso, tal como se pode observar no cálculo da criticidade pelo cálculo do *RPN* [53]. Considerando a premissa de que os critérios de criticidade têm o mesmo peso, o cálculo da criticidade torna-se bastante expedito, porém o seu valor matemático não representa uma realidade física. Dado que a importância relativa entre critérios não é tida em conta, existirão casos particulares onde os potenciais modos de falha com valores de *RPN* baixos apresentam perigos potenciais que não são priorizados [11,17,19,46,48,54–57];
- (2) Pillay & Wang [17] destacam outra limitação da não-linearidade da escala de Ocorrência, dado ser uma escala cujos índices são atribuídos segundo uma probabilidade de ocorrência, probabilidade essa cujo crescimento não é linear, levando à alteração da priorização do risco [19,53,57];
- (3) A fim de obter-se o nível de criticidade pelo cálculo de *RPN*, verifica-se que para diferentes classificações atribuídas aos critérios de Severidade, Ocorrência e Detetabilidade obteve-se o mesmo valor de *RPN* [11,17,19,46,53–57]. No exemplo demonstrativo da Tabela 6, Lipol & Haq [5] elucidam esta limitação:

*Tabela 6 - Exemplo ilustrativo RPN's iguais com diferentes classificações de S, O,D
(Fonte: Adaptado de [52])*

Modo de falha	Severidade	Ocorrência	Detetabilidade	<i>RPN</i>
Potencial modo A	2	10	5	100
Potencial modo B	10	2	5	100
Potencial modo C	2	5	10	100
Potencial modo D	10	5	2	100

Observando o exemplo acima ilustrado (Tabela 6), verifica-se que para diferentes modos de falha o valor de criticidade é igual nos quatro potenciais modos de falha.

Se se realizar somente uma análise ao valor de *RPN*, a conclusão seria que os quatro potenciais modos de falha eram igualmente prioritários. Todavia, se analisar tecnicamente cada modo de falha e esmiuçar o valor de cada critério, verificar-se-á o seguinte:

- Os potenciais modos de falha A e C são menos severos, porém recorrentes;
- Os potenciais modos de falha B e D apresentam maior severidade, porém pouco/igual recorrentes face aos potenciais modos de falha A e C.

Sem analisar o critério de Detetabilidade, verifica-se de imediato um caso de incerteza para que seja tomada uma decisão. Desta forma, a incerteza associada induz a que sejam obtidas conclusões contestáveis.

- (4) A avaliação dos três critérios torna o processo de caracterização exaustivo levando ao aparecimento do erro humano [58] e necessita que esteja uma equipa polivalente focada nesse fim [46,53]. É uma limitação bastante penalizadora, dado que em contexto nacional, as organizações não dispõem de recursos financeiros ou humanos suficientes para que sejam desencadeadas tais ações.

Assim no próximo capítulo, é realizada uma revisão às metodologias que permitam priorizar o nível de risco dos potenciais modos de falha. É notório que potenciais modos de falha com valores elevados se destaquem dos restantes, sendo fácil a sua identificação. O problema surge quando é necessário distinguir modos de falha com valores iguais que surjam como baixa criticidade, e que na realidade apresentem criticidade alta.

3. Metodologias *MCDM*

3.1. Tomada de decisão baseada em multicritérios

Face às limitações existentes na metodologia *FMEA*, debatidas pela comunidade científica, é exigido o desenvolvimento de novas estratégias que permitam mitigar as mesmas. As limitações incidem principalmente no cálculo da criticidade, necessitando desta forma de soluções que reforcem o seu cálculo. Em alternativa aos métodos expeditos por avaliação de peritos, com por exemplo o método *Delphi*, existem métodos mais eficazes e objetivos, quanto se trata da tomada de decisão na presença de vários critérios. Para tal, assume-se que as metodologias baseadas em multicritérios (*MCDM*) serão mais indicadas, indo ao encontro das estratégias a delinear.

As bases da *MCDM* remontam a 1906 e devem-se a Vilfredo Pareto, o primeiro investigador a publicar formalmente trabalhos nesta área de estudo, em concreto no seu trabalho intitulado de “*Manual of Political Economy*” [59]. Mais tarde em 1960, a área de investigação *MCDM* expandiu em diferentes áreas com intuito de enfrentar os demais problemas. O esquema base de qualquer estudo *MCDM* é exposto na Figura 10.

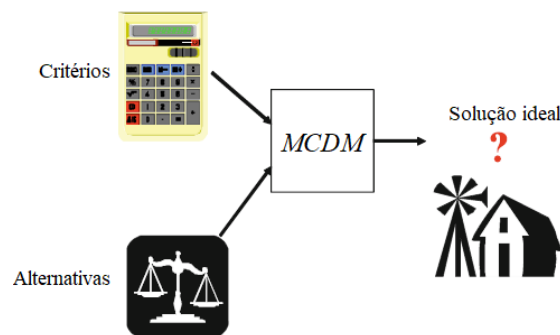


Figura 10 - Abordagem da tomada de decisão baseada em multicritérios
(Fonte: Adaptado de [60])

Liu *et al.* [55] realizaram uma investigação onde reuniram os demais trabalhos que agregam metodologias *MCDM* à *FMEA* para colmatar as suas limitações, destacando-se quatro metodologias das mais exploradas pela comunidade científica:

- Metodologia *Analytical Hierarchy Process (AHP)*;
- Metodologia *Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL)*;
- Metodologia *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)*;
- Metodologia *VlseKriterijuska Optimizacija I Komoromisno Resenje (VIKOR)*.

3.2. Metodologia AHP

3.2.1. Aplicação da metodologia AHP

A metodologia AHP foi desenvolvida por Thomas L. Saaty [61–63], com o objetivo de reduzir o estudo de sistemas complexos a uma sequência de múltiplas comparações. Esta metodologia contabiliza a incerteza na tomada de decisão humana, e como tal, permite quantificar as comparações entre as alternativas a fim de realizar a escolha da melhor alternativa tendo em consideração aos critérios estabelecidos e analisados.

Saaty publicou algumas obras onde aplica o seu método aos demais setores afetos à economia industrial (produção, transporte/logística, entre outros) como também trabalhos na área da sociologia [62,64]. Trata-se de um método cuja versatilidade permitiu a aplicação em diversos contextos. Por exemplo, Improta *et al.* [65] aplicaram a metodologia AHP a casos de estudo no sector da saúde.

A metodologia AHP é definida como uma análise hierárquica à tomada de decisão baseada em multicritérios, possibilitando que critérios quantitativos sejam comparados com critérios não-quantitativos e que de outra forma não poderiam ser avaliados [66]. Tal análise hierárquica é evidenciada no esquema da Figura 11.

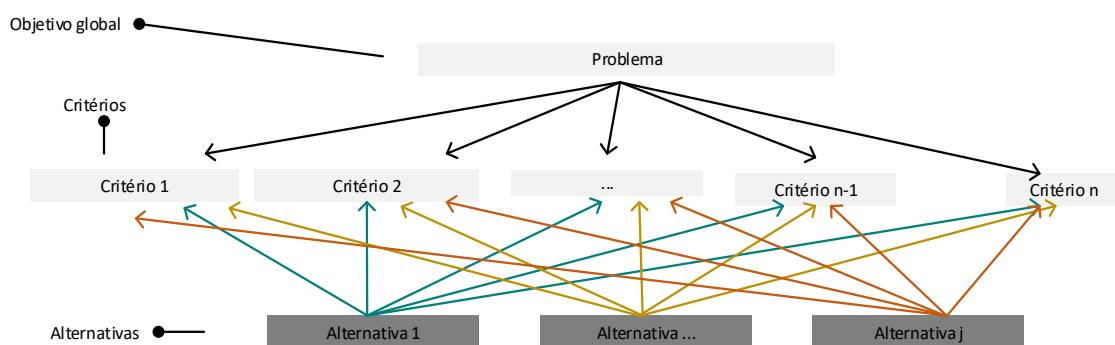


Figura 11 - Estrutura de hierarquização do método AHP - exemplo

A metodologia AHP é defendida por muitos autores, porém existem autores que a contestam. A título demonstrativo, Holder [67] enumera algumas limitações da metodologia, entre as quais, a validação dúbia dos resultados como também a escala de classificação das comparações que considera pouco robusta. Em suma, na Tabela 7 apresentam-se as principais vantagens e desvantagens da metodologia AHP.

Tabela 7 - Vantagens e desvantagens da metodologia AHP
(Fonte: Adaptado de [68])

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Apresenta uma vasta gama de áreas de aplicabilidade tais como no planeamento, análise de riscos, rácio custo-benefício entre outras; • Decisões objetivas/subjetivas quer qualitativas/quantitativas são uma fonte importante de informação de auxílio durante o processo de tomada de decisão; • Metodologia expedita que fornece uma solução simples e flexível; • Metodologia que analisa a sensibilidade das decisões tomadas pelos demais elementos do júri; • Permite apoiar a tomada de decisão a partir de diferentes pontos de abordagem. 	<ul style="list-style-type: none"> • A reciprocidade entre valores da matriz de comparação ainda é bastante discutida na literatura da área; • A metodologia AHP é baseada em medições probabilísticas e de possibilidade; • Aumentando o número de níveis na hierarquia, o número de comparações entre elementos requer um esforço na capacidade computacional como também o modelo fica menos sensível na tomada de decisão; • Impossibilidade de aplicar a metodologia somente para desempatar exclusivamente dois elementos de critérios/alternativas.

3.2.2. Algoritmo da metodologia AHP

O algoritmo da metodologia AHP é descrito pelos seguintes tópicos:

- Definição do problema a analisar e determinar o tipo de resultados pretendidos;
- Estruturação da hierarquia de decisão a partir do objetivo principal, e de seguida, estruturar os objetivos numa perspetiva ampla, passando pelos níveis intermediários até se atingir as alternativas propostas ao problema;
- Execução das diretrizes da metodologia abaixo descritas.

Segue-se a exposição das diretrizes desenvolvidas por Saaty [61,63,69,70]:

1º passo: Classificar individualmente cada critério (a_{ij}) comparativamente aos restantes, e inserir tal classificação na matriz de comparação $[A]$, evidenciada na expressão (2).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1j} \\ 1/a_{12} & 1 & \cdots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & 1 & \vdots \\ 1/a_{1j} & 1/a_{2j} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

As atribuições às comparações par-a-par entre critérios/ alternativas são expostas na Tabela 8.

Tabela 8 - Tabela de comparações entre critérios/alternativas - AHP
(Fonte: Adaptado de [61])

Classificação	Nível de importância	Definição AHP
1	Igual	Contribuem igualmente para o objetivo
3	Pequeno	Ligeira importância face à outra
5	Alto	Importância média face à outra
7	Muito alto	Importância alta face à outra
9	Absoluto	Importância absoluta face à outra
2, 4, 6, 8	Valores intermédios	Compromisso intermédio entre as definições anteriores
Recíprocos dos valores acima	Caso o elemento j receba um dos valores acima, a comparação adjacente entre elementos, j tem o valor recíproco de i	Designação razoável

Salienta-se a particularidade de que as posições da diagonal principal da matriz [A], apresentam valor unitário, dado que cada elemento é importante a si mesmo. Como tal, após as comparações par-a-par terem sido realizadas³, efetua-se o preenchimento na diagonal inferior da matriz [A] inserindo os valores recíprocos aos inseridos na diagonal superior da matriz.

2º passo: Somar os elementos de cada coluna da matriz [A]. Estes resultados representam numericamente as atribuições dadas pelo júri numa conjuntura por elemento.

A normalização é dada de acordo com a expressão (3).

$$\sum_{i=1}^n v_i(A_j) = 1 \quad (3)$$

Onde:

n corresponde ao número total de comparações par-a-par;

$$v_i(A_j) = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}$$

3º passo: Determinar o vetor de prioridades que inclua cada critério [C_k], de acordo com a expressão (4).

³ Efetuam-se $n(n-1)/2$ comparações para uma matriz $n \times n$, sendo n o número de linhas/colunas.

$$v_k(A_j) = \frac{\sum_{i=1}^n v_i(A_j)}{n} \quad (4)$$

4º passo: Efetuar as comparações ao nível dos critérios, ou seja, comparar par-a-par as alternativas em função de cada critério. Nesse contexto, adotar uma comparação par-a-par dos demais critérios em análise que são normalizados pela seguinte expressão (5).

$$w_i(C_j) = \frac{C_{ij}}{\sum_{i=1}^m C_{ij}}, j = 1 \dots m \quad (5)$$

Onde:

m corresponde ao número de critérios do mesmo nível.

5º passo: Determinar o vetor de prioridades das alternativas de cada critério individualmente, dado pela expressão (6).

$$w(C_j) = \frac{\sum_{i=1}^m w_i(C_j)}{m}, i = 1 \dots m \quad (6)$$

6º passo: Agregar os valores finais das alternativas por intermédio da função aditiva, através da expressão (7).

$$f(A_j) = \sum_{i=1}^m w(C_i) \cdot v_i(A_j), j = 1 \dots n \quad (7)$$

Obtêm-se desta forma a ordenação global do desempenho das alternativas ao objetivo geral por meio de uma função global de valor.

A metodologia *AHP* é suportada pela realização de sucessivas comparações entre critérios e como tal, tais comparações poderão apresentar-se como logicamente incompatíveis. Saaty [62,64], desenvolveu um processo que permite a detecção de incongruências resultantes de comparações deficientes realizadas pelo júri. Desta forma, para a verificação da consistência lógica das comparações realizadas [64] é efetuada em cada comparação o cálculo do Índice de Consistência (*CI*) e de seguida o cálculo da Razão de Consistência (*CR*), tal como se evidencia na expressão (8) e na expressão (9) respetivamente.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (8)$$

Onde:

n é a dimensão da matriz $[A]$;

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{Aw_i}{w_i}.$$

$$RC = \frac{CI}{RI} \quad (9)$$

O índice aleatório (RI) é um índice experimental, no qual Saaty realizou ensaios experimentais até comparações entre 15 elementos. Mais tarde, Donegan & Dodd [71] realizaram ensaios experimentais até comparações entre 100 elementos, tal como se podem evidenciar na Tabela 9.

*Tabela 9 - RI de Saaty vs RI de Donegan-Dodd
(Fonte: Adaptado de [71])*

n	RI de Saaty	RI de Donegan & Dodd
2	0.000	0.000
3	0.580	0.489
4	0.900	0.805
5	1.120	1.059
6	1.240	1.179
7	1.320	1.252
8	1.410	1.373
9	1.450	1.406
10	1.490	1.421
11	1.510	1.497
12	1.480	1.508
13	1.560	1.515
14	1.570	1.526
15	1.590	1.531
20	-	1.537
30	-	1.577
40	-	1.598
50	-	1.610
60	-	1.618
70	-	1.623
80	-	1.628
90	-	1.621
100	-	1.634

Na Tabela 9 existe uma particularidade que demonstra uma das principais fraquezas da metodologia *AHP*: face a uma decisão entre duas alternativas, o método não apresenta robustez para o desempate. Verifica-se assim que o contributo de Donegan & Dodd [71] acrescenta pouco valor à metodologia *AHP*, devido ao facto de que quanto mais critérios forem sujeitos à comparação, menor será a influência de cada um deles como também o processo de cálculo computacional se torna moroso.

Após se ter obtido o resultado da razão de consistência, é possível concluir o seguinte:

- Caso $CR < 0.1$, verifica-se que a matriz de comparação é consistente e como tal, é válida;
- Caso $CR > 0.1$, verifica-se que a matriz de comparação não é consistente e como tal, é necessário reformular as comparações par-a-par para que satisfaçam as condições de consistência lógica.

3.3. Metodologia *DEMATEL*

3.3.1. Aplicação da metodologia *DEMATEL*

A metodologia *DEMATEL* foi desenvolvida em 1971 no Instituto de Genebra, tendo como base de aplicação a resolução de um conjunto de temas de elevada complexidade e responsabilidade social tais como a pobreza, alterações climáticas e sustentabilidade energética, entre outros [72]. Segundo Si *et al.* [73], a potencialidade da presente metodologia permitiu agregar e complementar outras metodologias de apoio à tomada de decisão, tal como se observa no gráfico da Figura 12.

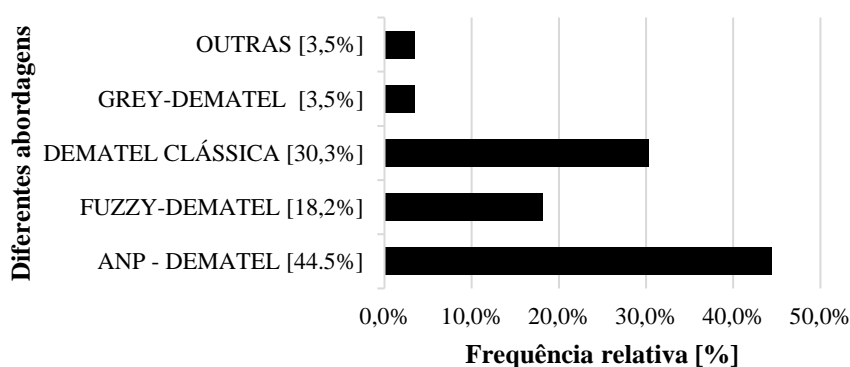


Figura 12 - Diversificação da aplicabilidade da metodologia *DEMATEL*
(Fonte: Adaptado de [73])

É caracterizada por adotar operações matriciais a fim de calcular a interação estabelecida entre factos causais. Através de um mapa de relação causa-efeito, a metodologia *DEMATEL* quantifica a influência causada por cada fator, permitindo desta forma identificar o foco de incidência do problema [72].

Segundo Lee *et al.* [74], a análise realizada pela metodologia *DEMATEL* deverá satisfazer os seguintes pressupostos:

- Definições exatas das propriedades do sistema: devem ser confirmadas para que garantam a precisão da solução;
- Precisão nos fatores: cada fator deve ser tipificado com base no problema e deve ser determinado para essas descrições;
- Relações do problema: a dependência entre fatores do problema deve ser determinada, usando uma atribuição compreendida entre 0 a 4.

3.3.2. Algoritmo da metodologia *DEMATEL*

A metodologia *DEMATEL* objetiva correlacionar os diferentes fatores de modo a providenciar soluções por intermédio de processos comparativos utilizando operações matriciais. Segundo Qu *et al.* [75], o procedimento de *DEMATEL* é dado pelos seguintes passos:

1º passo: Construir uma escala de medição e determinar as relações casuais entre fatores. Para tal, existe a necessidade de identificar todos os fatores envolvidos de um sistema, utilizando a título demonstrativo sessões de *brainstorming* ou pesquisa por especialistas no setor.

2º passo: Estabelecer uma matriz de relação direta $[X]$. Os valores da própria matriz representam a influência entre fatores. A diagonal da matriz de relação direta é preenchida a 0, dado que a relação causal do fator entre si é nula tal como se observa na expressão (10).

$$X = \begin{bmatrix} 0 & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & 0 & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & 0 & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

3º passo: Calcular a matriz de relação direta normalizada. Para determinar o fator de normalização dever-se-á considerar o cálculo pela expressão (11):

$$\lambda = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (11)$$

Após determinado λ , segue a determinação da matriz de relação direta normalizada $[N]$, dada pela expressão (12):

$$N = \lambda \cdot X \quad (12)$$

4º passo: Calcular a matriz de relação total $[T]$, dada pela expressão (13):

$$T = \lim_{k \rightarrow \infty} (N + N^2 + \dots + N^k) = N(I - N)^{-1} \quad (13)$$

Onde:

I representa a matriz identidade.

5º passo: Somar os valores de cada linha e coluna na matriz de relação total. Seja D_i a soma da coluna i e R_j a soma da linha j . D_i é determinado pela expressão (14), que corresponde à influência indireta:

$$D_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (14)$$

R_j é determinado pela expressão (15), que corresponde à influência direta:

$$R_j = \sum_{i=1}^n t_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

6º passo: Seja $(D + R)$ o total de relações de causa-efeito dos critérios específicos, que exprime a importância dos critérios no problema. Seja $(D - R)$ a relação das diferenças entre causa-efeito dos critérios específicos, que exprime as relações casuais dos critérios no problema, onde um valor positivo indica que os critérios têm maior peso na causa e um valor negativo indica que os critérios têm maior peso no efeito.

Após serem conhecidos $(D + R)$ e $(D - R)$, constrói-se um diagrama de causa-efeito. $(D + R)$ é representado no eixo das abcissas e $(D - R)$ é representado no eixo das ordenadas, tal como se observa na Figura 13.

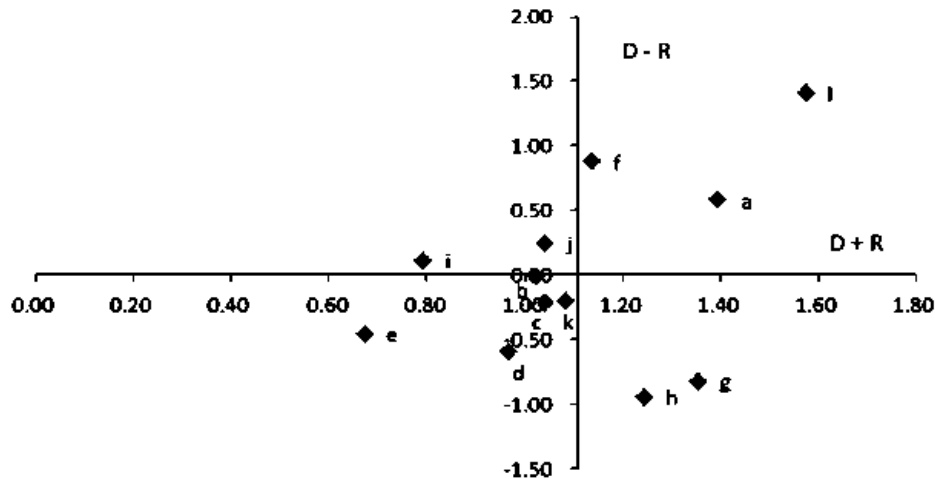


Figura 13 - Diagrama causa-efeito da metodologia DEMATEL
(Fonte: Adaptado de [72])

Com base na localização no diagrama de causa-efeito, os resultados podem ser diferenciados nas seguintes tipologias [72]:

- Valores positivos de $(D_k - R_k)$ e pronunciados de $(D_k + R_k)$, k é um fator de causa e um fator de atuação de resolução do problema.
- Valores positivos de $(D_k - R_k)$ e pouco pronunciados de $(D_k + R_k)$, k é um fator independente que influencia poucos fatores.
- Valores negativos de $(D_k - R_k)$ e pouco pronunciados de $(D_k + R_k)$, k é um fator independente que é influenciado por poucos fatores.
- Valores negativos de $(D_k - R_k)$ e pronunciados de $(D_k + R_k)$, k é um problema principal que requer uma solução. No entanto é um atributo de efeito, ou seja, não pode ser mitigado diretamente.

Em suma, observando o diagrama da Figura 13, verifica-se que [a], [f] e [l] são os três fatores que mais influenciam os restantes fatores naquele caso. A conclusão fulcral da aplicação da metodologia DEMATEL é que seja atingida um processo de adequação e execução de propostas de melhorias possibilitando a melhoria do desempenho destes três fatores com o intuito de minimizar os seus efeitos de falha mais severos, permitindo assim resolver os problemas de maior ênfase do sistema, pois como já referido são os que mais influenciam o próprio sistema.

3.4. Metodologia *TOPSIS*

3.4.1. Aplicação da metodologia *TOPSIS*

A metodologia *TOPSIS* foi desenvolvida por Hwang & Yoon em 1981 e tem como base um método simples de classificação do desempenho de alternativas a multicritérios para um dado problema real [76–79]. Apresenta a particularidade de considerar as soluções ideais positivas e soluções ideais negativas à análise de uma solução ideal matemática, tendo por base o cálculo das distâncias euclidianas ao mesmo.

Segundo Hwang & Yoon [76], as soluções ideais-positivas são definidas como a soma das melhores classificações atribuídas a cada critério, enquanto que as soluções ideais-negativas são definidas como a soma das piores classificações atribuídas a cada critério.

Na revisão bibliográfica de Behzadian *et al.* [77] é notório que esta metodologia é um elemento de auxílio à tomada de decisão. Também Salih *et al.* [80] destacam a importância das soluções focadas nos critérios de benefício e de custo que possibilitam gerir da melhor forma as ações de manutenção a desencadear nos ativos físicos.

Os principais setores onde este método tem sido aplicado ao longo dos últimos anos são [76]:

- Departamentos de engenharia (Manutenção, Projeto, Produção);
- Gestão ambiental e recursos hídricos;
- Gestão da cadeia de fornecedores e logística;
- Gestão energética urbana;
- Recursos humanos/ Saúde e segurança no trabalho [81].

Dada a aplicabilidade da metodologia *TOPSIS*, Ghosh *et al.* [78] enumeram algumas vantagens e desvantagem, tal como se pode evidenciar na Tabela 10.

Tabela 10 - Vantagens e desvantagem da metodologia *TOPSIS*
(Fonte: Adaptado de [78])

Vantagens	Desvantagem
<ul style="list-style-type: none">• Apresenta a capacidade de quantificar matematicamente o desempenho relativo da decisão entre as demais alternativas à solução “alvo” do problema;• Cálculo computacional eficiente;• Método expedito e de fácil interpretação.	<ul style="list-style-type: none">• Para que seja determinado o peso correspondente a cada critério corretamente, dever-se-á utilizar outras metodologias <i>MCDM</i>, tais como a metodologia <i>AHP</i>.

3.4.2. Algoritmo da metodologia TOPSIS

Segundo Lima & Carpinetti [82], a metodologia TOPSIS é composta pelos seguintes passos:

1º passo: Construir uma matriz de decisão $[D]$ correspondente ao desempenho das alternativas conforme a expressão (16). Observa-se que A_i ($i=1 \dots n$) representa as demais alternativas de análise e C_j ($j=1 \dots m$) indica os demais critérios de decisão.

$$D = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_m \\ \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1j} & \dots & d_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{i1} & d_{i2} & \dots & d_{ij} & \dots & d_{im} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nj} & \dots & d_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (16)$$

Na expressão (17), W corresponde ao vetor do peso w_j de cada critério C_j de modo a que $\sum_{i=1}^m w_j = 1$. Ghosh *et al.* [78] propõem a adequação de outras metodologias MCDM, tais como a metodologia AHP, para atribuir quantitativamente o valor adequado a cada peso.

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_m] \quad (17)$$

2º passo: Normalizar e ponderar a matriz $[D]$. Para tal, deverá ser efetuado o cálculo da expressão (18).

$$[N] = n_{ij} = \frac{w_j \cdot d_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m w_j \cdot d_{ij}^2}}, i = 1 \dots n, j = 1 \dots m \quad (18)$$

Onde w_j corresponde o peso de cada critério de modo a permitir o cálculo da ponderação.

3º passo: Determinar a solução ideal positiva (A^+) e a solução ideal negativa (A^-) respeitante a cada critério de acordo com as expressões (19) e (20), respetivamente.

$$A^+ = \{^{MAX}_j n_{ij} \mid j = 1, 2, \dots, m\} = \{n_1^+, \dots, n_j^+, \dots, n_m^+\} \quad (19)$$

$$A^- = \{^{MIN}_j n_{ij} \mid j = 1, 2, \dots, m\} = \{n_1^-, \dots, n_j^-, \dots, n_m^-\} \quad (20)$$

4º passo: Calcular a distância D_i^+ para os valores de desempenho da matriz normalizada ponderada e os respectivos valores de n_j^+ , pela expressão (21).

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (n_{ij} - n_j^+)^2} \quad (21)$$

5º passo: Calcular a distância D_i^- para os valores de desempenho da matriz normalizada ponderada e os respectivos valores de n_j^- , pela expressão (22).

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (n_{ij} - n_j^-)^2} \quad (22)$$

6º passo: Calcular o coeficiente de aproximação (Cc_i) de acordo com a expressão (23), o qual corresponde ao desempenho global da alternativa i.

$$Cc_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (23)$$

7º passo: Ordenar as alternativas por ordem decrescente, segundo o seu Cc_i . A alternativa com desempenho mais próximo de 1 é a alternativa com melhor desempenho comparativamente às restantes, no âmbito do estudo realizado.

3.5. Metodologia VIKOR

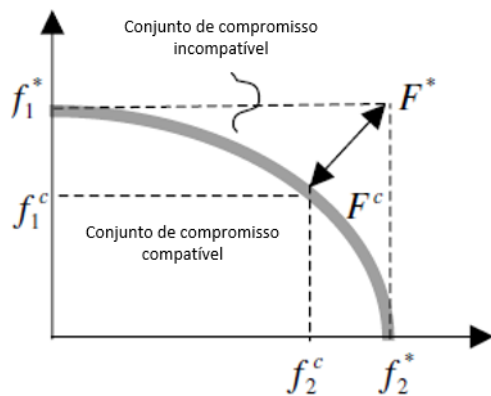
3.5.1. Aplicação da metodologia VIKOR

A metodologia VIKOR desenvolvida por Opricovic [83], é uma das metodologias que se mais destaca pela capacidade seletiva e de ordenação das alternativas para os demais critérios em análise. É aplicada em casos de elevada complexidade [84], tais como o apoio à tomada de decisão baseada em critérios de programação não-linear entre outros, permitindo que este método tenha sido alvo de estudo de muitos autores ao longo do tempo em diversos domínios, tal como se pode observar na Tabela 11.

Tabela 11 - Estudos de aplicabilidade da metodologia VIKOR
(Fonte: Adaptado de [83])

Áreas de estudo da metodologia VIKOR	
Avaliação de desempenho	Gestão financeira e de risco
Cadeia de fornecedores industriais	Marketing
Energia renovável e sustentabilidade	Produção industrial
Gestão de infraestruturas	Saúde/ Outras

Segundo Opricovic [85], a metodologia VIKOR permite estabelecer um compromisso entre as melhores decisões individuais a cada critério de forma a criar uma solução única à conjuntura global do problema. A fim de explicar o conceito VIKOR, apresenta-se a representação gráfica da Figura 14 que aborda a tomada de decisão entre dois critérios.



Onde:

- F^* - Decisão “alvo” entre C_1 e C_2 ;
- F^c - Compromisso “alvo” entre C_1 e C_2 ;
- f_1^* - Solução ideal positiva de C_1 ;
- f_2^* - Solução ideal positiva de C_2 ;
- f_1^c - Solução de compromisso de C_1 ;
- f_2^c - Solução de compromisso de C_2 .

Figura 14 - Conceito da metodologia de VIKOR
(Fonte: Adaptado de [85])

Existe uma solução “alvo” e uma solução de compromisso “real” entre ambos os critérios tipificados, sendo a solução “real” a única que pode ser aplicada ao sistema.

Desta forma a metodologia VIKOR vai ao encontro do melhor compromisso entre a solução “ideal” e a solução “real”, ou seja, representa a menor distância entre soluções, tal como se observa graficamente na Figura 14.

3.5.2. Algoritmo da metodologia VIKOR

Segundo Tong *et al.* [86], os problemas de tomada de decisão baseados em multicritério, tipicamente são representados por uma matriz de decisão tal como se pode observar na Figura 15.

$$\begin{array}{c}
 x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_n \\
 A_1 \left[\begin{array}{cccc} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \end{array} \right] \\
 A_2 \left[\begin{array}{cccc} x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \end{array} \right] \\
 \vdots \\
 A_m \left[\begin{array}{cccc} x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{array} \right]
 \end{array}$$

Figura 15- Matriz de decisão

Observando a matriz da Figura 15, verifica-se que A_i representa cada alternativa e x_j representa cada critério de decisão. Por último, x_{ij} corresponde ao desempenho de cada alternativa respeitante ao critério de decisão. Após a exposição e explicação do significado da matriz de decisão de VIKOR, seguem as diretrizes de cálculo:

1º passo: Determinar a matriz de decisão normalizada $[F]$. A matriz normalizada é apresentada pela expressão (24):

$$F = [f_{ij}]_{m \times n} \quad (24)$$

Onde:

$$f_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, (i = 1, 2, \dots, m), (j = 1, 2, \dots, n)$$

2º passo: Determinar a solução ideal-positiva $\{A^*\}$ e a solução ideal-negativa $\{A^-\}$. Ambas são determinadas pelas expressões (25) e (26) respetivamente:

$$A^* = \{(\max f_{ij} | j \in J) \text{ or } (\min f_{ij} | j \in J') | i = 1, 2, \dots, m\} = \{f_1^*, f_2^*, \dots, f_j^*, \dots, f_n^*\} \quad (25)$$

$$A^- = \{(\min f_{ij} | j \in J) \text{ or } (\max f_{ij} | j \in J') | i = 1, 2, \dots, m\} = \{f_1^-, f_2^-, \dots, f_j^-, \dots, f_n^-\} \quad (26)$$

Onde:

$$\begin{aligned}
 J &= \{j = 1, 2, \dots, n | f_{ij}, \text{ a resposta preferencial}\} \\
 J' &= \{j = 1, 2, \dots, n | f_{ij}, \text{ a resposta menos preferencial}\}
 \end{aligned}$$

3º passo: Calcular os fatores de medida favorável e menos favorável, sendo determinados pelas expressões (27) e (28) respetivamente:

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot \frac{(f_j^* - f_{ij})}{(f_j^* - f_j^-)} \quad (27)$$

$$R_i = \text{Max}_j \left[w_j \cdot \frac{(f_j^* - f_{ij})}{(f_j^* - f_j^-)} \right] \quad (28)$$

Onde w_j corresponde ao peso atribuído a cada critério j .

4º passo: Calcular o Índice de *VIKOR* [Q_i], pela expressão (29).

$$Q_i = v \cdot \left[\frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} \right] + (1 - v) \cdot \left[\frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \right] \quad (29)$$

Onde:

Q_i = índice de *VIKOR* da alternativa i ;

$S^* = \text{Min}_i S_i$;

$S^- = \text{Max}_i S_i$;

$R^* = \text{Min}_i R_i$;

$R^- = \text{Max}_i R_i$;

v = factor de ajuste (tipicamente é 0.5), de acordo com a literatura [87].

5º passo: Ordenar por ordem decrescente a classificação das alternativas.

A alternativa com menor valor de Q_i é considerada a solução ideal do problema.

Assim, as principais conclusões obtidas pela metodologia *VIKOR* são [86]:

- A melhor alternativa determinada pelo método de *VIKOR* está mais próximo da solução ideal-positiva e mais distante da solução ideal-negativa;
- A melhor alternativa de acordo com o método *VIKOR* possui a utilidade máxima na tomada de decisão e garante o mínimo de incerteza;

A metodologia *VIKOR* é aplicável em diferentes contextos de programação linear (*LP*) [88], descrita pela expressão (30):

$$L_p = \left\{ \sum_{j=1}^n \left[w_j \cdot \frac{(f_j^* - f_{ij})}{(f_j^* - f_j^-)} \right]^p \right\}^{\frac{1}{p}}, \quad l \leq p \leq \infty, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (30)$$

O uso e exploração da métrica L_p , permite concluir e extrair diversas informações de tomada de decisão face ao problema em particular [85].

3.6. Comentários adjacentes às metodologias MCDM

Durante a investigação na literatura técnica de quatro das metodologias mais investigadas pela comunidade científica no domínio *MCDM*, o objetivo passa em determinar novos contributos à tomada de decisão. Após a presente análise das mesmas, as metodologias *AHP* e *TOPSIS* são as que mais se enquadram na conjugação com a lógica *Fuzzy* não só pelo facto de serem metodologias com uma estrutura de cálculo simples, como pelo facto de que permitem agregar a lógica *Fuzzy* sem inserir lacunas nos resultados que advenham.

Salih *et al.* [80] enfatizam a sinergia da lógica *Fuzzy* e *TOPSIS* (*F-TOPSIS*), tendo sido contabilizadas mais de duas mil publicações, entre 2010 e 2017.

No próximo capítulo será abordada a metodologia *F-TOPSIS* elucidando as definições inerentes à lógica *Fuzzy*, como também a forma como é aplicada à metodologia *TOPSIS*, permitindo *à posteriori* averiguar os ganhos resultantes da conjugação das mesmas a fim de reunir os conceitos teóricos necessários para propor uma metodologia ao estudo da presente dissertação, tal como se pode observar no esquema da Figura 16.

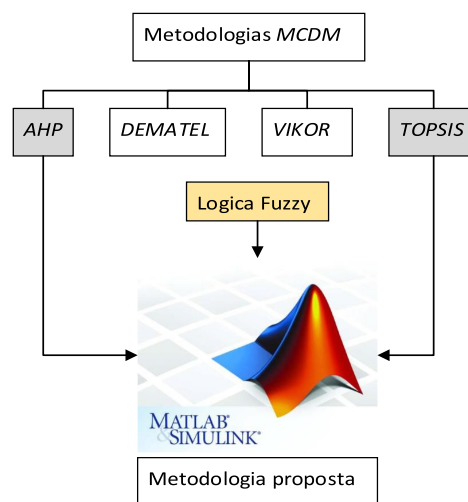


Figura 16 - Esquema da sinergia entre metodologias MCDM

O *software* utilizado no desenvolvimento da metodologia proposta trata-se de um *software* cuja designação advém de *Matrix Laboratory* (*Matlab*) criado pela empresa *MathWorks*[®].

Tal *software* apresenta uma linguagem de programação análoga às diversas aplicações de programação utilizadas em contexto de informática.

Na Figura 17 evidencia-se a interface gráfica do *software* bem como a identificação dos elementos principais do seu ambiente gráfico.

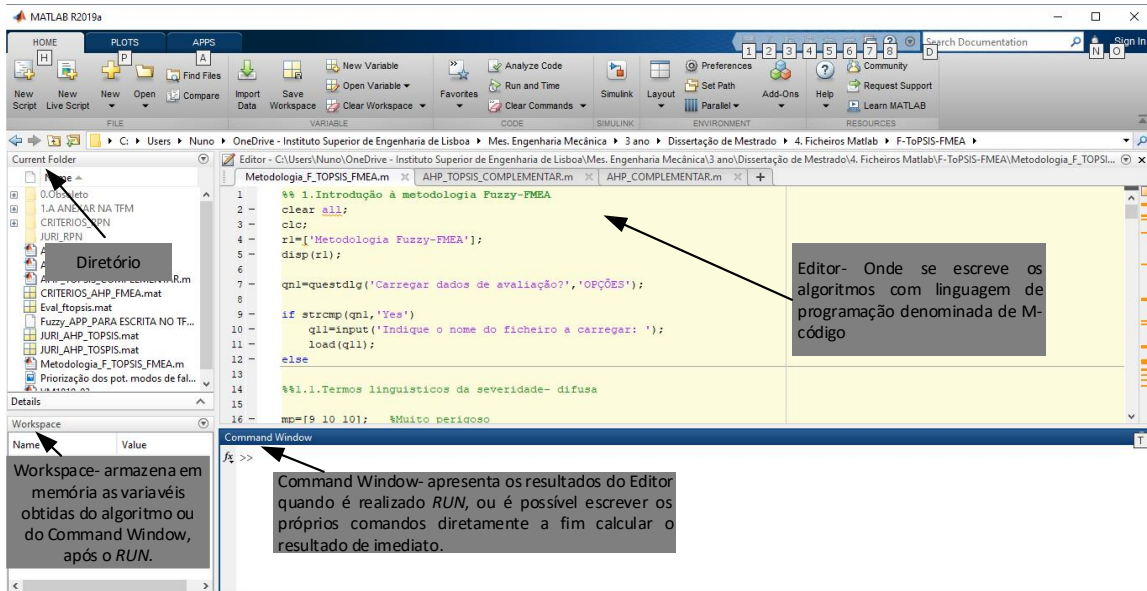


Figura 17 - Interface gráfica do software Matlab

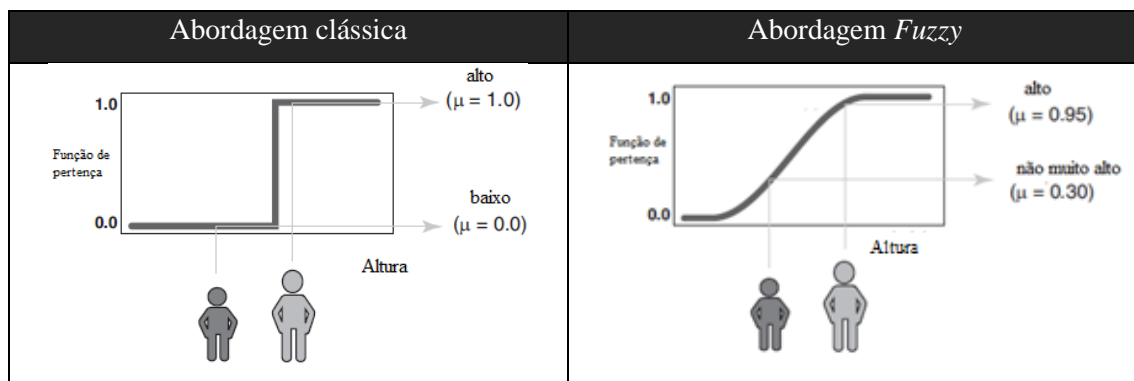
4. Metodologia *F-TOPSIS*

4.1. Lógica *Fuzzy* - enquadramento

A lógica *Fuzzy* desenvolvida em 1965 por Zadeh [89], também denominada de lógica difusa [90], foi criada com intuito de construir uma linguagem matemática que considerasse a imprecisão, subjetividade e incerteza humana durante o processo de tomada de decisão [91]. A solução estabelecida por Zadeh foi de construir uma lógica que utilizasse um conceito da quantificação de um elemento face ao universo global no qual é inserido. Desta forma, criou-se uma linguagem matemática flexível capaz de caracterizar e inferir relações imprecisas tal como é possível observar na linguagem/comunicação humana [90,92,93].

A título demonstrativo, as comparações de altura entre duas pessoas segundo uma abordagem clássica e uma abordagem *Fuzzy*, são evidenciadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Abordagem clássica vs Abordagem *Fuzzy*
(Fonte: Adaptado de [94])



Enquanto na abordagem clássica observa-se um estado binário ao decidir a altura do sujeito, “ou a pessoa é baixa ou a pessoa é alta”, segundo uma abordagem *Fuzzy* é possível quantificar a incerteza da altura da pessoa baseada no universo de pessoas que a rodeia. Assim a lógica *Fuzzy* pode ser integrada em inúmeros contextos entre os quais [94] se podem dar os seguintes exemplos:

- Qualidade de um serviço baseado em multicritérios de satisfação. Caso um sujeito tome uma refeição num restaurante, existem inúmeros critérios que definem a qualidade da mesma desde o atendimento ao público, à qualidade da refeição ou até mesmo ao tempo de espera, entre outros aspetos quantitativos e qualitativos;

- Ajuste da temperatura de conforto num dado sistema de ar condicionado de uma sala de aula.

Como consequência surge a dúvida de como se processa a lógica *Fuzzy* em ferramentas de tomada de decisão. Segundo Chanamool & Naenna [9], a lógica *Fuzzy* contribui às metodologias de tomada de decisão na medida de englobar os seguintes aspetos:

- Apresenta flexibilidade na atribuição de classificações, sem que com isso influencie fortemente a decisão final;
- Apresenta uma grande tolerância a dados imprecisos e pouco mensuráveis;
- Baseia-se na linguagem natural, em concreto na linguagem comunicativa humana. É construída sobre estruturas qualitativas de linguagem humana sendo de fácil utilização;
- Permite quantificar matematicamente a incerteza humana na avaliação dos factos;
- Permite modelar funções não-lineares, como por exemplo o critério de Ocorrência presente na metodologia *FMEA*.

A fim de que seja perceptível tal lógica à avaliação do risco, o esquema evidenciado na Figura 18 permite clarificar como se processa até se obter o resultado da avaliação de risco de um dado ativo físico.

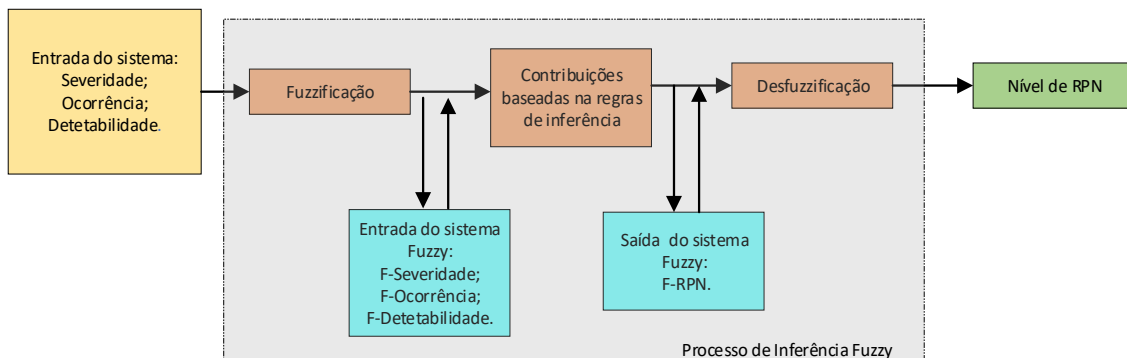


Figura 18 - Passos de cálculo de um sistema baseada na lógica *Fuzzy*
(Fonte: Adaptado de [93])

Observando a Figura 18, a aplicação da teoria dos conjuntos difusos é descrita em três passos:

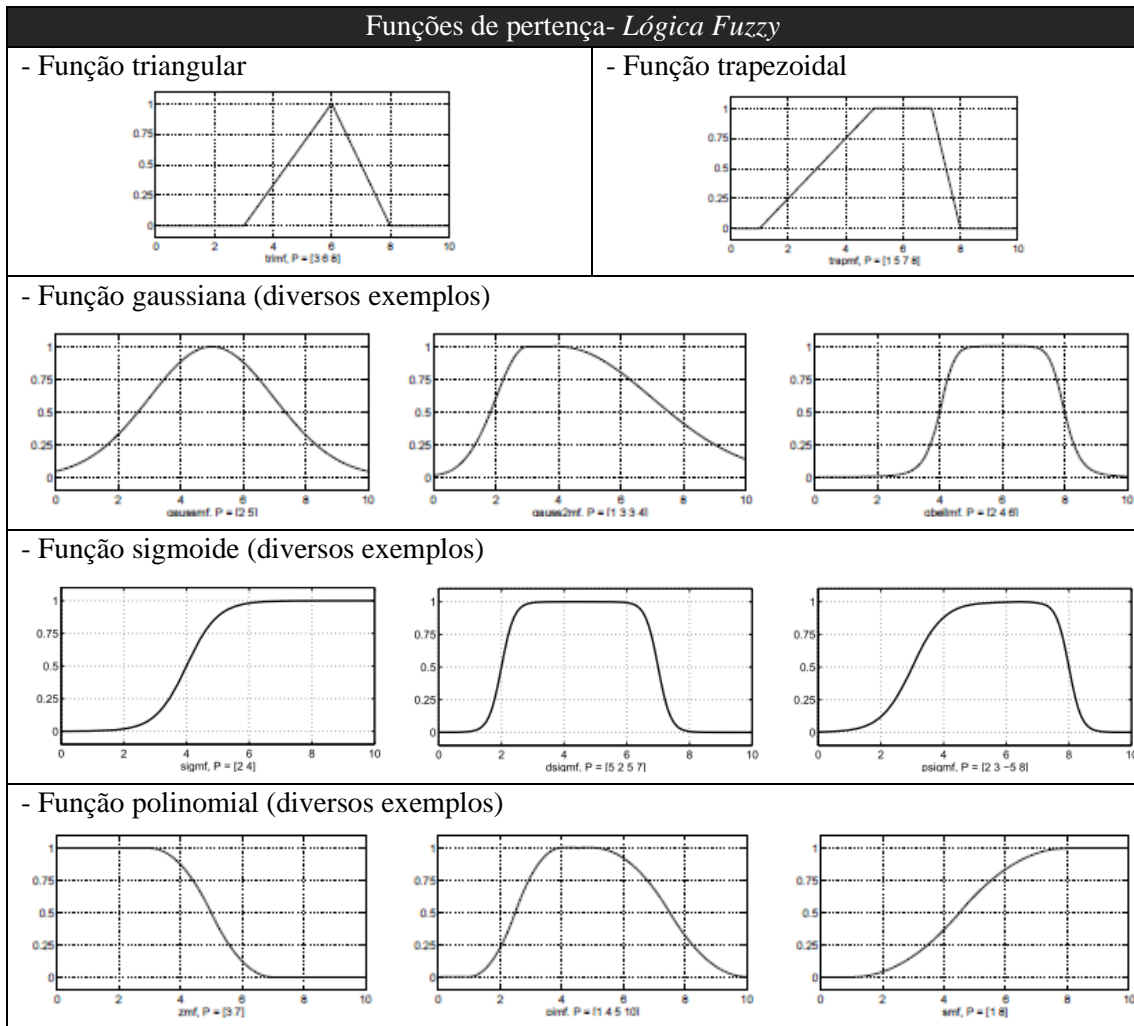
1º passo – Fuzzificação:

A fim de determinar o cálculo do *RPN*, é necessário atribuir classificações aos critérios de Severidade, Ocorrência e Detetabilidade numa escala de 1-10 e

posteriormente definir as funções de pertença a fim de converter a classificação atribuída em número difuso. A função de pertença, trata-se de uma função que pode variar numa gama compreendida entre 0 e 1. Poderá ser uma simples curva arbitrária ou uma curva bem definida matematicamente.

Na Tabela 13 tipificam-se as funções de pertença mais usadas.

Tabela 13 - Tipos de função de pertença da Lógica Fuzzy
(Fonte: Adaptado de [94])



Observando as demais funções de pertença evidenciadas na Tabela 13, por uma questão de linearizar a quantificação da incerteza humana no presente trabalho será utilizada a função de pertença triangular, permitindo estabelecer um compromisso à *posteriori* com a metodologia *TOPSIS*.

2º passo - Contribuições das regras de inferência Fuzzy:

As regras de inferência Fuzzy são construídas por uma equipa onde são estabelecidas um conjunto de regras do tipo *se-então* [13,90].

Cada regra poderá ser dada pelo exemplo abaixo descrito:

“se a severidade é baixa, a ocorrência é reduzida e a deteção é moderada, então o risco é baixo.”

Dado que a classificação de cada critério apresenta uma atribuição de 1-10 seria necessário construir 1000 regras de inferência Fuzzy (10 x 10 x 10), o que tornaria o processo de elaboração moroso.

- Operadores difusos:**

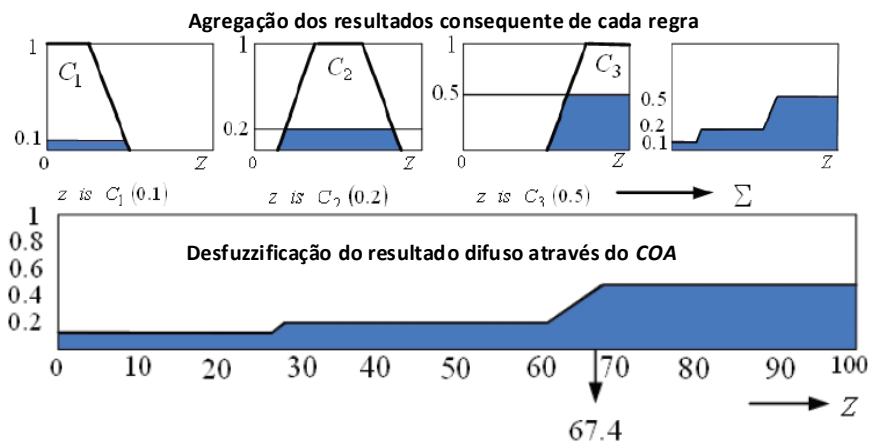
Este processo é constituído pela agregação dos resultados obtidos das regras consoante a operação lógica adotada. As principais operações lógicas são as observadas na Tabela 14.

Tabela 14 - Operações lógicas - Lógica Fuzzy
(Fonte: Adaptado de [94])

AND- Min (A, B)	OR – Max (A, B)	NOT- (1-A)

3º passo – Defuzzificação:

O processo de defuzzificação trata-se de um processo que permite transformar o valor difuso num valor exato, tal como se pode observar no esquema da Figura 19.



Segundo Yeh & Hsieh [13], existem vários processos de desfuzzificação, sendo os mais empregues os abaixo apresentados:

- *Centroid Of Area (COA)*;
- *Bisector Of Area (BOA)*;
- *Mean Value Of Maximum (MVOM)*;
- *Smallest Absolute Value Of Maximum (SAVM)*;
- *Largest Absolute Value Of Maximum (LAVM)*.

O *COA* destaca-se dos restantes dado garantir a simplicidade computacional sem com isso afetar as conclusões provenientes dos estudos efetuados [94], pois considera o peso de todos os cenários em análise de uma forma igualitária. O processo de desfuzzificação pelo método *COA* é dado pela seguinte expressão (31):

$$y^* = \frac{\sum_i \bar{y}_i \cdot w_i}{\sum_i w_i} \quad (31)$$

Onde w_i corresponde à área e \bar{y}_i corresponde à posição do centro de área, respetivamente. Após ter-se realizado o cálculo para todas as avaliações realizadas pela equipa de trabalho, obtêm-se os resultados de forma a que sejam priorizados os que apresentem maiores valores de risco, segundo uma lógica *Fuzzy*.

4.2. Metodologia *F-TOPSIS*

Indo ao encontro da lógica *Fuzzy* e do compromisso em criar uma adequação da mesma à metodologia *TOPSIS* (*F-TOPSIS*), a ligação de ambas permite desafiar a resolução de certas limitações do cálculo da criticidade da metodologia *FMEA*. A relação sinérgica entre as metodologias de tomada de decisão com a linguagem descrita pela lógica *Fuzzy* torna-se uma mais valia nas equipas de tomada de decisão. Os elementos de júri são confrontados por questões e/ou particularidades imprecisas, indefinidas e incertas que advêm da falta de conhecimento técnico, falta de experiência ou por outro fator em particular, dificultando desta forma o processo de tomada de decisão.

Segundo Salih *et al.* [69], a lógica *Fuzzy* permite ultrapassar tal componente de incerteza, pois a teoria dos conjuntos difusos permite responder a análises subjetivas [78–80]. Entre os demais desenvolvimentos da comunidade científica, a metodologia que

mais adota um fundamento contextualizado ao objetivo da presente dissertação é a metodologia *F-TOPSIS* desenvolvida por Chen [69,81–86].

4.2.1. Algoritmo da metodologia *F-TOPSIS*

No presente subcapítulo é descrito o algoritmo da metodologia *F-TOPSIS* de Chen [95], sendo apresentadas as principais definições categóricas e suas propriedades [88–91].

- **Definições categóricas**

Definição 1: Um conjunto difuso $\tilde{A} \in X$ é caracterizado por uma função de pertença $\mu_{\tilde{A}}(x)$ que associa cada elemento x em X a um número real no intervalo $[0,1]$. O valor de $\mu_{\tilde{A}}(x)$ é denominado de grau de pertença de x em \tilde{A} .

Definição 2: Um conjunto difuso $\tilde{A} \in X$ é convexo se e só se qualquer $x_1, x_2 \in X$, e satisfaçam a condição da expressão (32).

$$\mu_{\tilde{A}}(\lambda \cdot x_1 + (1 - \lambda) \cdot x_2) \geq \text{Min}(\mu_{\tilde{A}}(x_1), \mu_{\tilde{A}}(x_2)) \quad \forall \lambda \in [0,1] \quad (32)$$

Onde:

$\mu_{\tilde{A}}(\cdot)$ - Resultado de um valor difuso através da função pertença associada;

λ - Constante numérica $\in [0,1]$.

Definição 3: Um conjunto difuso $\tilde{A} \in X$ é denominado de conjunto *Fuzzy-normal* se for verificada a condição evidenciada na expressão (33).

$$\exists x_i \in X, \mu_{\tilde{A}}(x_i) = 1 \quad (33)$$

Onde:

$\mu_{\tilde{A}}(\cdot)$ - Resultado de um valor difuso através da função pertença associada.

Definição 4: Um número difuso $[\tilde{n}]$ é tratado como um subconjunto contido no universo X que é convexo e normal. Na Figura 20 evidencia-se um exemplo representativo de um número difuso.

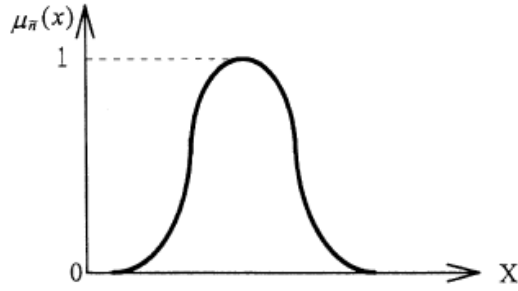


Figura 20 - Representação de um número difuso- \tilde{n}
(Fonte: Adaptado de [95])

Definição 5: α -cut de um número difuso, \tilde{n} , é dado pela condição evidenciada na expressão (34).

$$\tilde{n}^\alpha = \{x_i: \mu_{\tilde{n}}(x_i) \geq \alpha, x_i \in X\}, \forall \alpha \in [0,1] \quad (34)$$

\tilde{n}^α é definido como um intervalo fechado não-vazio contido em X que pode ser representado por $\tilde{n}^\alpha = [n_l^\alpha, n_u^\alpha]$, onde n_l^α e n_u^α são os limites inferiores e superiores respeitantes ao intervalo fechado, tal como se observa no exemplo da Figura 21.

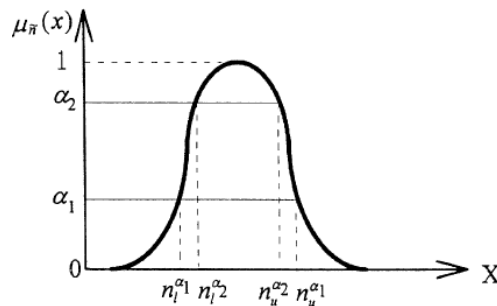


Figura 21 - Representação de um número difuso- \tilde{n} com α – cut
(Fonte: Adaptado de [95])

Definição 6: o número difuso-triangular $[\tilde{n}]$, é um número definido por $(n1, n2, n3)$. É satisfeito por uma função ramificada tal como a da expressão (35).

$$\mu_{\tilde{n}}(x) = \begin{cases} 0, & x < n1 \\ \frac{x - n1}{n2 - n1}, & n1 \leq x \leq n2 \\ \frac{x - n3}{n2 - n3}, & n2 \leq x \leq n3 \\ 0, & x > n3 \end{cases} \quad (35)$$

Graficamente é representado, tal como o exemplo da Figura 22.

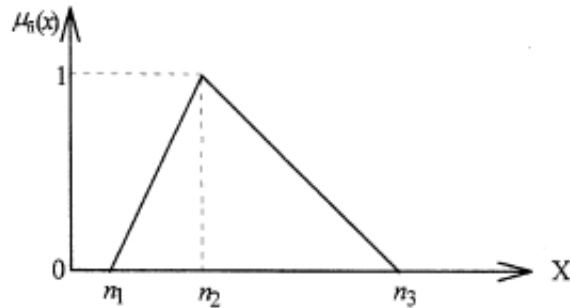


Figura 22 - Número difuso triangular- \tilde{n}
(Fonte: Adaptado de [95])

Definição 7: Se \tilde{n} é um número difuso e $n_i^\alpha > 0$ para $\alpha \in [0,1]$, então \tilde{n} é designado de número difuso positivo. Considerando dois números difusos positivos $\tilde{m}(m_1, m_2, m_3)$ e $\tilde{n}(n_1, n_2, n_3)$, as principais operações matemáticas encontram-se evidenciadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Operações matemáticas contextualizadas à Lógica Fuzzy
(Fonte: Adaptado de [96])

Adição	$(\tilde{m} (+) \tilde{n})^\alpha = [m_1^\alpha + n_1^\alpha, m_2^\alpha + n_2^\alpha, m_3^\alpha + n_3^\alpha]$
Subtração	$(\tilde{m} (-) \tilde{n})^\alpha = [m_1^\alpha - n_1^\alpha, m_2^\alpha - n_2^\alpha, m_3^\alpha - n_3^\alpha]$
Multiplicação	$(\tilde{m} (\cdot) \tilde{n})^\alpha = [m_1^\alpha \cdot n_1^\alpha, m_2^\alpha \cdot n_2^\alpha, m_3^\alpha \cdot n_3^\alpha]$
Constante	$\tilde{m}(\cdot) r = [m_1^\alpha \cdot r, m_2^\alpha \cdot r, m_3^\alpha \cdot r]$
Inversão	$(\tilde{m}^\alpha)^{-1} = [\frac{1}{m_3^\alpha}, \frac{1}{m_2^\alpha}, \frac{1}{m_1^\alpha}]$

Definição 8: Sejam $\tilde{m} = (m_1, m_2, m_3)$ e $\tilde{n} = (n_1, n_2, n_3)$ dois números difusos-triangulares. Se $\tilde{m} = \tilde{n}$, então $m_1=n_1, m_2=n_2$ e $m_3=n_3$.

Definição 9: Se \tilde{n} é um número difuso-triangular e $\tilde{n}_i^\alpha > 0, \tilde{n}_i^\alpha \leq 1$ para qualquer $\alpha \in [0,1]$, então \tilde{n} é denominado de número difuso-triangular normalizado positivo.

Definição 10: \tilde{D} é denominada de matriz difusa, se pelo menos uma das posições da mesma seja ocupada por um número difuso.

Definição 11: Uma variável linguística é uma variável à qual é atribuída um termo linguístico. Este conceito é uma mais valia para lidar com situações que sejam complexas ou onde sejam presenciadas indefinições, impossibilitando desta forma adequar métodos mais tradicionais. A título demonstrativo, a atribuição qualitativa de baixo, médio ou alto para estabelecer a altura de uma pessoa, trata-se de uma atribuição linguística que pode ser representada pela teoria dos conjuntos difusos.

Definição 12: Sejam $\tilde{m} = (m1, m2, m3)$ e $\tilde{n} = (n1, n2, n3)$ dois números difusos-triangulares onde é utilizado o *COA* para calcular a distância entre os mesmos, o cálculo é realizado através da expressão (36):

$$d(\tilde{m}, \tilde{n}) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot [(m1 - n1)^2 + (m2 - n2)^2 + (m3 - n3)^2]} \quad (36)$$

Definição 13: Sejam \tilde{m} e \tilde{n} dois números difusos-triangulares. \tilde{m} está mais próximo de \tilde{n} , quando $d(\tilde{m}, \tilde{n}) \rightarrow 0$. Diversos autores propõem diferentes abordagens para o cálculo da distância, contudo o *COA* é descrito como o mais eficaz na realização deste cálculo⁴ [97].

Desta forma, será descrito o algoritmo da metodologia *F-TOPSIS* de Chen [95]:

1º passo: Identificar os critérios de avaliação segundo o veredito de uma equipa multidisciplinar criada para o devido efeito;

2º passo: Definir os termos linguísticos para a escala de avaliação de cada critério. Realizar a avaliação dos critérios e o indicar o peso de cada critério por todos os membros da equipa de júri para cada alternativa, respetivamente;

3º passo: Agregar a classificação atribuída por cada membro da equipa de júri⁵ numa classificação global de cada critério respetivo. De acordo com a expressão (37) ficará registado como \tilde{x}_{ij} da alternativa A_i de cada critério C_j .

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{1}{K} [\tilde{x}_{ij}^1 (+) \tilde{x}_{ij}^2 (+) \dots (+) \tilde{x}_{ij}^K] \quad (37)$$

Agregar o peso de cada membro da equipa em cada critério respetivo, pela expressão (38).

⁴ **Nota:** No Anexo II, são descritas as propriedades relevantes do cálculo de desfuzzificação pelo *COA*.

⁵ **Nota:** O número total de membros da equipa multidisciplinar é dado por K .

$$\tilde{w}_j = \frac{1}{K} [\tilde{w}_{ij}^1 (+) \tilde{w}_{ij}^2 (+) \dots (+) \tilde{w}_{ij}^K] \quad (38)$$

De acordo com a expressão (39), tal resultado ficará expresso num vetor de ponderação $[\tilde{W}]$.

$$\tilde{W} = [\tilde{w}_1 \quad \tilde{w}_2 \quad \dots \quad \tilde{w}_n] \quad (39)$$

4º passo: Construir a matriz de decisão difusa e de seguida a matriz de decisão difusa normalizada.

A matriz de decisão difusa $[\tilde{D}]$ é dada pela expressão (40).

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix} \quad (40)$$

Onde $\tilde{x}_{ij}, \forall i, j$ é preenchido por termos linguísticos descritos por números difusos-triangulares. Genericamente é representado por $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$.

A matriz difusa normalizada $[\tilde{R}]$ é dada pela expressão (41) e pode ser obtida por dois critérios.

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n} \quad (41)$$

Critério de benefício – B, evidenciado na expressão (42).

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^+}, \frac{b_{ij}}{c_j^+}, \frac{c_{ij}}{c_j^+} \right), \quad j \in B \quad (42)$$

Onde $c_j^+ = \max_i c_{ij}$.

Critério de custo – C, evidenciado na expressão (43).

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}} \right), \quad j \in C \quad (43)$$

Onde: $a_j^- = \min_i c_{ij}$.

O objetivo da normalização é de garantir a propriedade dos números difusos, no intervalo de $[0, 1]$.

5º passo: Construir a matriz de decisão difusa normalizada ponderada $[\tilde{V}]$. A ponderação do peso de cada critério permite desta forma ajustar a avaliação de cada critério à importância do mesmo. O cálculo da ponderação é dado pela expressão (44).

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n}; \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (44)$$

Onde: $\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} (\cdot) \tilde{w}_j$.

6º passo: Determinar a solução ideal-difusa positiva ($FPIS, A^+$) e a solução ideal-difusa negativa ($FNPIIS, A^-$) entre os demais elementos de cada coluna da matriz $[\tilde{V}]$.

Desta forma, resultará um vetor das soluções ideal-positiva, evidenciado pela expressão (45) e um vetor das soluções ideal-negativa, evidenciado pela expressão (46).

$$A^+ = [\tilde{v}_1^+ \quad \tilde{v}_2^+ \quad \dots \quad \tilde{v}_n^+] \quad (45)$$

$$A^- = [\tilde{v}_1^- \quad \tilde{v}_2^- \quad \dots \quad \tilde{v}_n^-] \quad (46)$$

Onde:

$$\tilde{v}_j^+ = (1, 1, 1);$$

$$\tilde{v}_j^- = (0, 0, 0).$$

7º passo: Calcular a distância de cada alternativa a partir de A^+ e A^- , respetivamente. O cálculo da distância é obtido pelo COA e em cada caso é calculado pela expressão (47) e pela expressão (48), respetivamente.

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+), \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (47)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-), \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (48)$$

8º passo: Calcular o coeficiente de aproximação de cada alternativa i , calculado pela expressão (49).

$$Cc_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (49)$$

9º passo: Ordenar os coeficientes de aproximação anteriormente calculados.

4.3. Comentários adjacentes à metodologia *Fuzzy-TOPSIS*

Segundo a abordagem de Chen [95] a adequação da teoria dos conjuntos difusos à metodologia *TOPSIS* permite superar determinadas limitações que outras metodologias apresentam. Assim é possível quantificar a incerteza humana à tomada de decisão quando é avaliada cada uma das alternativas face aos critérios correspondentes. Também possibilita a priorização com base nas avaliações de multicritérios da metodologia *TOPSIS* de uma forma bastante expedita.

Com esta metodologia, a adição de critérios de avaliação aumentará consequentemente o grau de complexidade do cálculo computacional, contudo não aumentará a dificuldade da execução do algoritmo tornando a ferramenta mais adequada ao estudo pretendido.

No capítulo 5 será descrita a metodologia proposta de forma a criar uma relação sinérgica entre a metodologia *F-TOPSIS* de Chen [95] à metodologia *FMEA*. Esta metodologia proposta terá como objetivo de reduzir as limitações da *FMEA* apresentando como base de trabalho a metodologia *F-TOPSIS* de Chen [95] de forma a que seja melhorado a priorização dos potenciais modos de falha de um dado ativo físico.

5. Metodologia proposta *Fuzzy-FMEA*

Neste capítulo será descrita a metodologia proposta no âmbito de solucionar algumas das limitações da *FMEA* clássica, sendo designada de metodologia *Fuzzy-FMEA*. A mesma apresenta a seguinte sequência de cálculo:

- Cálculo do peso dos critérios inerentes ao cálculo da criticidade (Severidade, Ocorrência e Detetabilidade) de cada potencial modo de falha. Este cálculo apresenta como base a metodologia *AHP*;
- Cálculo dos pesos de cada elemento de júri, demonstrando a influência que cada elemento tem à decisão final. O cálculo tem como base uma metodologia híbrida que agrega a metodologia *AHP* complementada pela metodologia *TOPSIS*;
- Cálculo do nível de criticidade de cada potencial modo de falha de uma análise *FMEA*. O cálculo tem como base a metodologia *F-TOPSIS* explicada no capítulo anterior.

Assim a sequência da metodologia proposta é evidenciada no esquema da Figura 23, onde todos os cálculos são realizados no *software Matlab*.

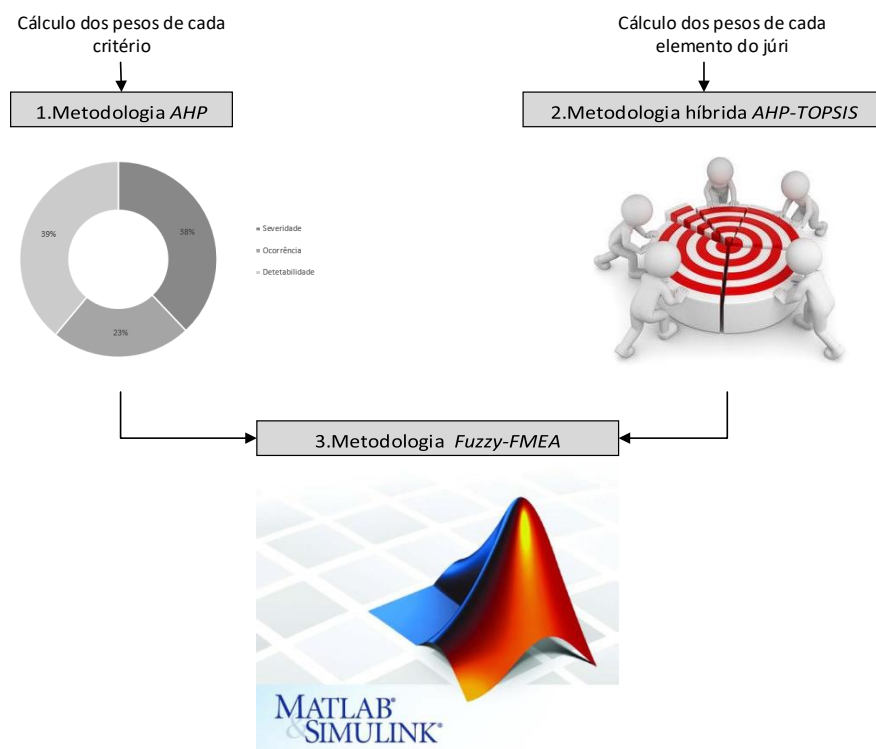


Figura 23 - Esquema da metodologia proposta

A metodologia proposta apresenta dois algoritmos auxiliares que permitem determinar o peso correspondente dos critérios de cálculo de criticidade como determinar o peso correspondente à influência de cada elemento do júri na avaliação dos potenciais modos de falha. Após obterem-se os resultados que advém desses algoritmos complementares, estes são inseridos no algoritmo principal da metodologia proposta.

A descrição da metodologia proposta é subdividida em 3 partes:

Parte 1: Algoritmo complementar referente à metodologia *AHP*, para determinar o peso de cada critério do cálculo da criticidade (subcapítulo 5.1);

Parte 2: Algoritmo complementar referente à metodologia híbrida *AHP-TOPSIS*, para determinar o peso associado a cada elemento do júri (subcapítulo 5.2);

Parte 3: Algoritmo referente à metodologia proposta *Fuzzy-FMEA*, que agrega os pesos obtidos nos algoritmos anteriores (subcapítulo 5.3).

5.1. Metodologia *Fuzzy-FMEA* – Parte 1

5.1.1. Estrutura hierárquica da metodologia *AHP* e suas definições

No presente subcapítulo são elucidados os passos fulcrais do algoritmo complementar referente à metodologia *AHP*. Este algoritmo permite determinar o peso de cada critério, os quais permitem determinar a criticidade de cada potencial modo de falha. Numa abordagem clássica, verifica-se que os critérios apresentam entre si o mesmo peso, e como tal, este algoritmo permite ajustar os pesos de forma a aproximar-se cada vez mais da realidade presente em cada estudo em particular.

Dado a metodologia que suporta este algoritmo é a metodologia *AHP*, na Figura 24 evidencia-se a estrutura de hierarquização da análise em causa.

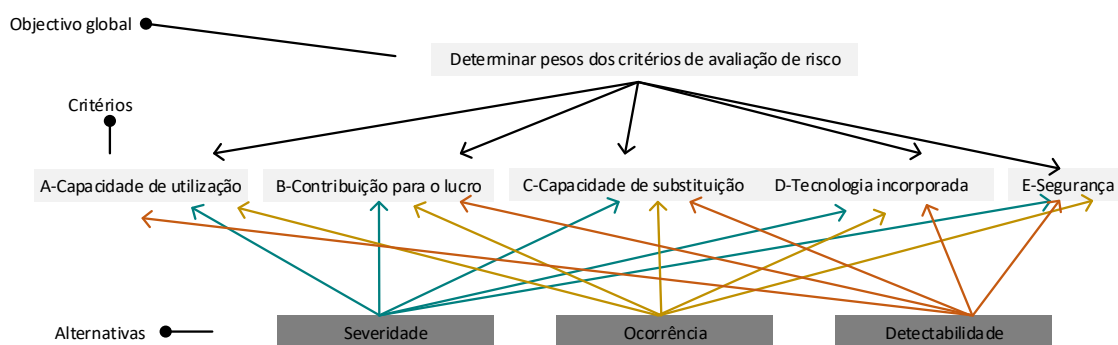


Figura 24 - Estrutura hierárquica do algoritmo complementar-AHP

Analisando a estrutura hierárquica da Figura 24, verificam-se cinco critérios de avaliação que são abaixo discriminados a fim de compreender os seus objetivos [98].

- Capacidade de utilização [CdU]: focado na componente de produção, este critério permite considerar a componente de engenharia de processo diferenciando os equipamentos que menores taxas produtivas apresentem ou equipamentos que estejam relacionados com o *bottleneck*⁶ de uma linha de produção.
- Contribuição para o lucro [CL]: focado no possível lucro económico que um equipamento pode contribuir a um dado processo produtivo.
Se se tratar de um equipamento cujo custo de aquisição seja elevado e o custo de subcontratação do serviço seja igualmente elevado, como por exemplo o corte de peças numa máquina laser ou a produção de peças numa linha de prensas em *tandem* no sector metalomecânico, leva a priorizar a resposta de intervenção de manutenção nestes equipamentos.
- Capacidade de substituição [CS]: focado na facilidade técnico-operacional em trocar os equipamentos/componentes, quando assim o exige. Devido às alterações necessárias a realizar aquando a troca do mesmo, quer nas infraestruturas quer no próprio processo produtivo, quer sejam por obrigações em termos legislativos e/ou obrigações estipuladas nos cadernos de encargos dos clientes, leva a que tais substituições por vezes originem enormes impactos económicos. A título demonstrativo, caso seja necessário substituir um equipamento avariado de grande porte, no qual é necessário içá-lo por intermédio de uma grua que por sua vez obriga a retirar parte da cobertura da nave industrial, sendo esta constituída por telhas de fibrocimento⁷, o custo de substituição da cobertura e seus encargos ambientais originam um aumento exponencial dos custos associados à substituição do mesmo.
- Tecnologia incorporada [TI]: focado na complexidade tecnológica geral de um equipamento. Existe a necessidade de priorizar certas ações de manutenção em detrimento de outros equipamentos, pois a sua falha origina custos elevados como variações no processo que desviem as tolerâncias produtivas dos limites de especificação, produzindo conseqüentemente produtos não conformes.

⁶ **Bottleneck:** ponto de estrangulamento de um dado processo. Existem limitações de capacidade produtiva, originando desta forma a acumulação de stock "*work in process*". É causado por deficiências no balanceamento dos processos, bem como limitações ao nível dos equipamentos.

⁷ **Telhas de fibrocimento:** também conhecidas na gíria nacional como telhas de *lusalite*. Constituídas por partículas cancerígenas que quando deterioradas/fissuradas geram sérios riscos ambientais e de saúde.

- Segurança [SG]: este critério contabiliza a segurança que o equipamento oferece aos diversos intervenientes quando ocorre um dado potencial modo de falha. A título demonstrativo, em qualquer equipamento da indústria nuclear, as decisões tomadas têm a premissa imperativa da segurança.

5.1.2. Fluxograma da metodologia AHP

Na Figura 25 é apresentado o fluxograma do algoritmo escrito em M-código⁸ para a atribuição dos pesos aos critérios inerentes ao cálculo da criticidade, segundo a metodologia proposta. A explicação do algoritmo encontra-se evidenciado no Anexo III e algoritmo evidenciado no Anexo IV da presente dissertação.

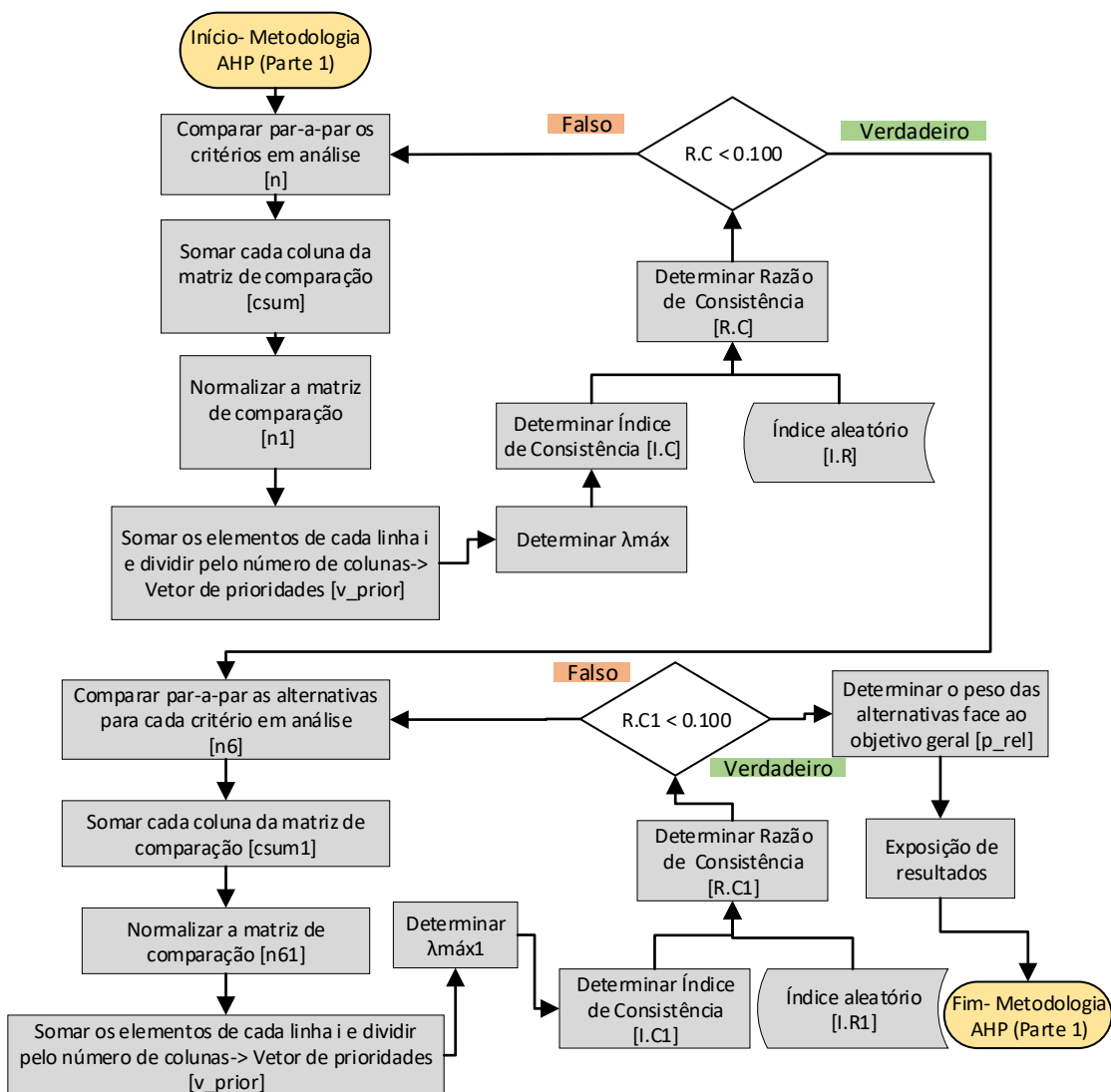


Figura 25 - Fluxograma do algoritmo AHP (Parte 1)

⁸ M-código: linguagem de programação em Matlab.

5.2. Metodologia *Fuzzy-FMEA* – Parte 2

A fim de calcular o peso de cada elemento do júri é necessário criar uma metodologia híbrida com a metodologia *AHP* e a metodologia *TOPSIS*, pois como já referido, a metodologia *AHP* não é robusta para desempatar análises exclusivas entre duas alternativas [67]. Atendendo que as equipas de avaliação são constituídas obrigatoriamente por mais do que um jurado, nada contradiz a possibilidade de serem constituídas exclusivamente por dois elementos.

No domínio de estudo *MCDM* existem alguns desenvolvimentos de metodologias híbridas que permitem agregar metodologias a fim de ter uma ferramenta mais coesa às análises a realizar. Neste âmbito destacam-se Bakhoun & Brown [99] que aplicaram tal hibridização de metodologias em áreas de estudo tais como a avaliação de microestruturas de ligas como também Jain *et al.* [100] aplicaram na seleção de fornecedores na indústria automóvel.

Desta forma, a exposição da metodologia híbrida usada no presente trabalho é apresentada na representação esquemática da Figura 26.

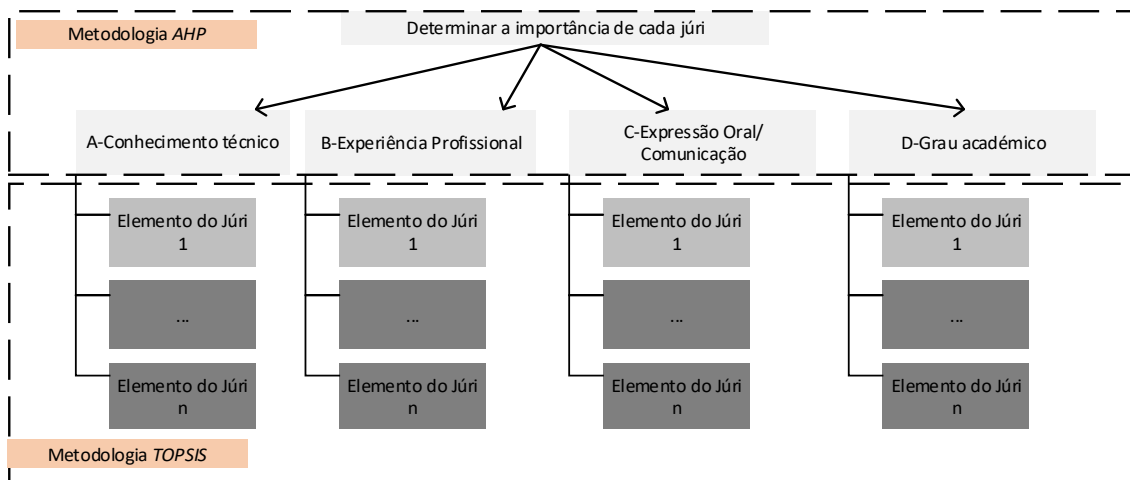


Figura 26 - Esquema da metodologia híbrida AHP-TOPSIS

5.2.1. Definições da metodologia *AHP* contextualizada e suas comparações par-a-par

Neste subcapítulo são evidenciadas as importâncias de cada critério definido ao objetivo geral. Zolfani *et al.* [101] enumeram oito principais critérios de análise a fim de quantificar a influência de cada elemento do júri (Tabela 16). Porém, dada a forte

correlação existente entre as mesmas, poderá suscitar comparações par-a-par dúbias, prejudicando desta forma todo o processo de decisão.

*Tabela 16 - Critérios de avaliação da influência de cada elemento do júri
(Fonte: Adaptado de [101])*

Critérios de avaliação dos elementos júri	
Capacidade de crítica construtiva	Habilidade técnica
Disciplina	Igualdade de género
Habilidade composta	Temperamento do indivíduo
Habilidade para trabalhar em grupo	Outras ideologias

Desta forma, no presente documento são totalizados quatro critérios para decidir qual a influência de cada elemento do júri, cujas definições são as seguintes:

- **Conhecimento Técnico [CT]:** é definido como o conhecimento técnico inerente ao equipamento em causa, sendo por vezes o fabricante o único titular da informação técnico-específica, garantindo que a assistência técnica seja realizada exclusivamente pelo fabricante como também permite fortalecer a cláusula de garantia do equipamento.
- **Experiência Profissional [EP]:** é definido como o número de anos que o jurado apresenta na área de análise. É logicamente dedutível que um jurado que apresente mais anos de experiência no setor em causa, apresente um leque de contextos anteriores/resoluções mais abrangente e como tal o seu contributo apresenta maior relevância, como na gestão de prioridades entre outros aspetos [102].
- **Expressão Oral/Comunicação [EO-C]:** é definido como o elo de ligação em toda a tomada de decisão. Permite que os jurados trabalhem de uma forma objetiva como também ajuda na partilha de conhecimentos [103].
- **Grau Académico [GA]:** é o processo académico que permite definir o quão intelectualmente desenvolvido é o jurado. Permite valorizar no sentido de reconhecer a facilidade de compreensão de certas temáticas como também apresenta uma facilidade em expor soluções diversas ao problema em causa. Desta forma, constitui-se como um provedor de conhecimento teórico da área, contudo não apresenta obrigatoriamente a ampliação dos conhecimentos técnicos dos equipamentos em análises consequentes.

5.2.2. Definições da metodologia *TOPSIS* contextualizada e suas classificações

No seguimento do ponto anterior, é preenchida a matriz de decisão [*D*] da metodologia *TOPSIS*, sendo atribuída uma classificação em cada critério de avaliação correspondente a cada jurado (escala quantitativa de 1 a 5).

Na Tabela 17 são apresentados os níveis de classificação do critério de Conhecimento Técnico para avaliar os elementos de júri da *FMEA*.

Tabela 17 - Classificações de Conhecimento Técnico [CT]

Nível	Designação	Escala de classificação
V	Conhecimentos técnicos no patamar do fabricante do equipamento	5
IV	Conhecimentos técnicos no patamar de entidade especializada na tipologia do equipamento em estudo	4
III	Conhecimentos técnicos no patamar médio de entidade especializada na tipologia do equipamento em estudo	3
II	Conhecimentos técnicos no patamar baixo de entidade especializada na tipologia do equipamento em estudo	2
I	Nenhum conhecimento técnico do equipamento em estudo	1

Na Tabela 18 são apresentados os níveis de classificação do critério de Experiência Profissional para avaliar os elementos de júri que participam na *FMEA*.

Tabela 18 - Classificações de Experiência Profissional [EP]

Nível	Experiência profissional [anos]	Escala de classificação
V	Experiência profissional > 30	5
IV	$10 < \text{Experiência profissional} \leq 30$	4
III	$5 < \text{Experiência profissional} \leq 10$	3
II	$1 < \text{Experiência profissional} \leq 5$	2
I	Experiência profissional ≤ 1	1

Na Tabela 19 são apresentados os níveis de classificação do critério de Expressão Oral/Comunicação para avaliar os elementos de júri da *FMEA*.

Tabela 19 - Classificações de Expressão Oral/Comunicação [EO-C]

Nível	Patamares de expressão oral/ comunicação	Escala de classificação
V	Comunicação clara e objetiva	5
IV	Comunicação clara, mas com objetivos pouco definidos	4
III	Comunicação pouco clara, mas com objetivos bem definidos	3
II	Comunicação medíocre, com objetivos pouco definidos	2
I	Comunicação dúbia, com objetivos pouco definidos	1

Na Tabela 20 são apresentados os níveis de classificação do critério de Grau Académico para avaliar os elementos de júri da *FMEA*.

Tabela 20 - Classificações de Grau Académico [GA]

Nível	Grau académico	Escala de classificação
V	Doutoramento	5
IV	Licenciatura pré-Bolonha/Mestrado	4
III	Licenciatura pós-Bolonha	3
II	Curso técnico-especializado	2
I	12º ano de escolaridade/Outros	1

5.2.3. Fluxograma da metodologia híbrida *AHP-TOPSIS*

Na Figura 27 é apresentado o fluxograma com as variáveis atribuídas no algoritmo escrito em M-código⁹ para a determinação da influência de cada elemento do júri à tomada de decisão, na metodologia proposta.

Destaca-se que a atribuição do peso dos critérios de avaliação é aplicada na metodologia *AHP* e de seguida para avaliar o desempenho de cada jurado recorre-se à metodologia *TOPSIS*. A explicação do algoritmo encontra-se evidenciada no Anexo V e o algoritmo encontra-se descrito no Anexo VI da presente dissertação.

⁹ **M-código:** linguagem de programação em *Matlab*.

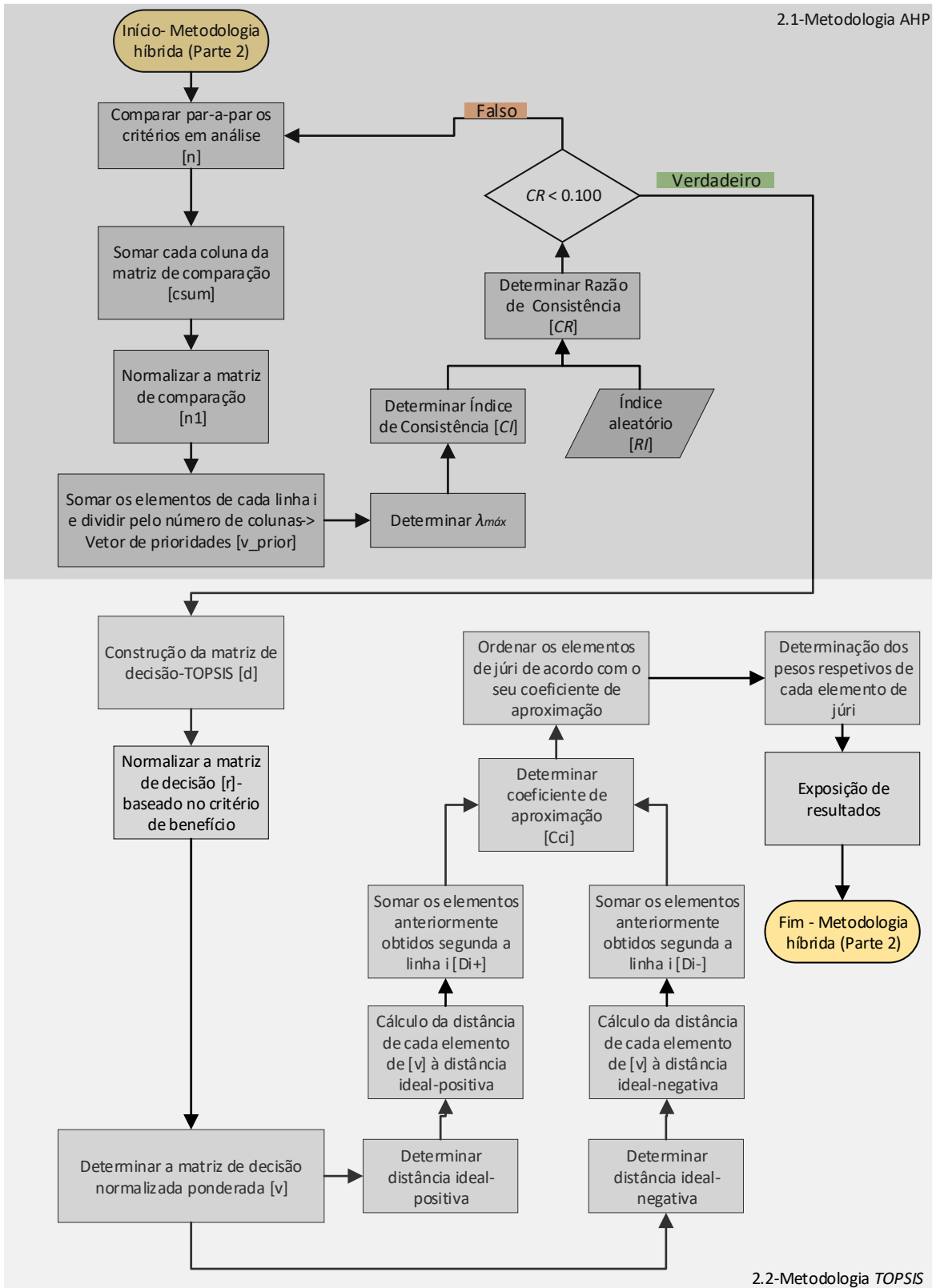


Figura 27 - Fluxograma do algoritmo híbrido AHP-TOPSIS (Parte 2)

5.3. Metodologia *Fuzzy-FMEA* – Parte 3

5.3.1. Caracterizações e definições globais da metodologia proposta

Neste subcapítulo são apresentadas as definições fulcrais que permitem avaliar os potenciais modos de falha face à metodologia proposta. Retomando à classificação dos demais critérios respeitantes ao cálculo da criticidade, verifica-se a necessidade de converter as escalas de classificação dos critérios em escalas com termos linguísticos a fim de proceder à análise.

São apresentados os índices de classificação difusos respeitantes aos critérios que permitem quantificar o nível de criticidade.

Na Tabela 21 evidencia-se a escala de classificação difusa associada ao critério de Severidade.

Tabela 21- Classificações do critério de Severidade difuso

Termo linguístico	Critério de Severidade difuso	Índice difuso
Muito perigoso [MP]	A falha é muito perigosa e sem aviso, punível por regulamentos organizacionais e governamentais.	(9,10,10)
Perigoso [P]	A falha é perigosa, punível por regulamentos organizacionais e governamentais.	(8,9,10)
Extremo [E]	O desempenho do produto/sistema encontra-se bastante afetado, estando inoperável.	(7,8,9)
Maior [M]	O desempenho do produto/sistema é severamente afetado, mas ainda funciona. Algumas funções básicas poderão funcionar.	(6,7,8)
Significante [S]	O desempenho do produto/sistema encontra-se alterado.	(5,6,7)
Moderado [MD]	Efeito moderado no produto/sistema. Necessita de reparação.	(4,5,6)
Baixo [B]	Pequeno efeito no produto/sistema. Não necessita de reparação.	(3,4,5)
Pequeno [PQ]	Efeito diminuto sentido no produto/sistema.	(2,3,4)
Muito pequeno [MPQ]	Efeito muito diminuto sentido no produto/sistema.	(1,2,3)
Nenhum [N]	Sem efeito no produto/sistema.	(0,1,2)

Este critério associado a uma linguagem difusa, pode ser descrito em termos evolutivos pelo gráfico da Figura 28, onde são notórias as funções de pertença triangulares.

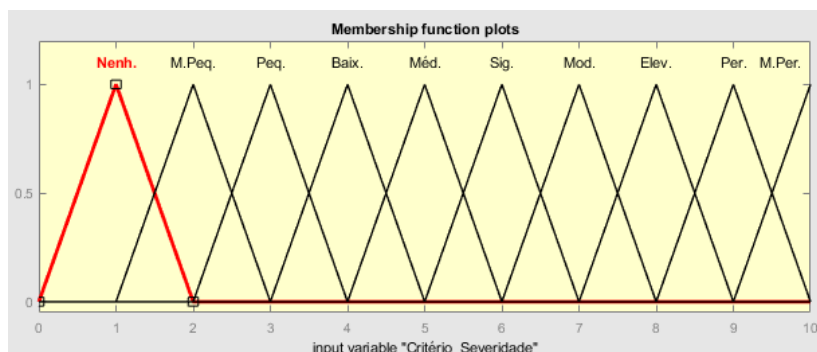


Figura 28 - Evolução do critério de Severidade difuso- funções de pertença para cada classificação

Na Tabela 22 é evidenciada a escala de classificação difusa associada ao critério de Ocorrência.

Tabela 22 - Classificações do critério de ocorrência difuso

Termo linguístico	Critério de Ocorrência [nº ocorrências/ano]		Índice difuso
Muito alta [MA]	Falha é inevitável	≥ 1 em 2	(9,10,10)
Alta III [AIII]	Falha repetida	1 em 3	(8,9,10)
Alta II [AII]		1 em 8	(7,8,9)
Alta I [AI]		1 em 20	(6,7,8)
Moderada III [MIII]	Falha ocasional	1 em 80	(5,6,7)
Moderada II [MII]		1 em 400	(4,5,6)
Moderada I [MI]		1 em 2000	(3,4,5)
Pequena II [PII]	Algumas falhas	1 em 15 000	(2,3,4)
Pequena I [PI]	Muitas poucas falhas	1 em 1 500 000	(1,2,3)
Muita pequena [MP]	Falha remota	≥ 1 em 1 500 000	(0,1,2)

Este critério associado a uma linguagem difusa, pode ser descrito em termos evolutivos pelo gráfico da Figura 29.

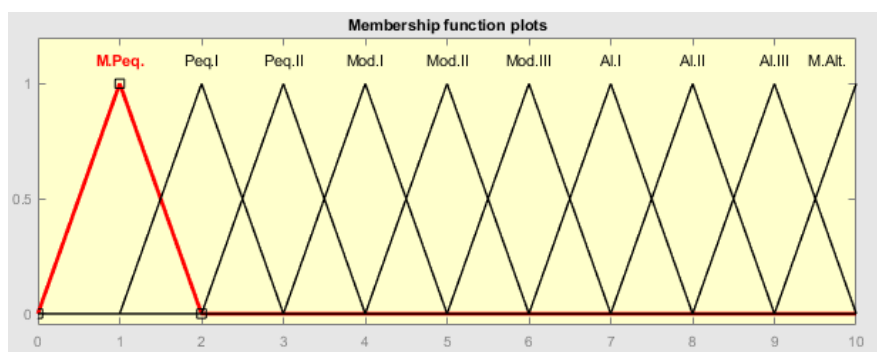


Figura 29 - Evolução do critério de Ocorrência difuso- funções de pertença para cada classificação

Na Tabela 23 é evidenciada a escala de classificação difusa associada ao critério de Detetabilidade.

Tabela 23 - Classificações do critério de Detetabilidade difuso

Termo linguístico	Critério de Detetabilidade	Índice difuso
Nenhuma [NH]	Não é possível detetar a causa/mecanismo de falha	(9,10,10)
Rara I [RI]	Rara chance de deteção da causa /mecanismo de falha	(8,9,10)
Rara II [RII]		(7,8,9)
Baixa I [BI]	Baixa chance de deteção da causa/mecanismo de falha	(6,7 8)
Baixa II [BII]		(5,6,7)
Alguma [ALG]	Alguma chance de deteção da causa/mecanismo de falha	(4,5,6)
Moderada [MOD]	Moderada chance de deteção da causa/mecanismo de falha	(3,4,5)
Alta [A]	Elevada chance de deteção da causa/mecanismo de falha	(2,3,4)
Muita alta [MAI]	Muita elevada chance de deteção da causa/mecanismo de falha	(1,2,3)
Certa [C]	A deteção da causa potencial/mecanismo de falha é certa	(0,1,2)

Este critério associado a uma linguagem difusa, pode ser descrito em termos evolutivos pelo gráfico da Figura 30.

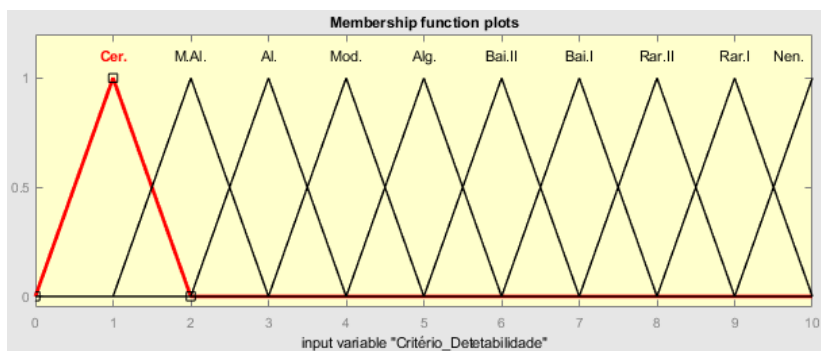


Figura 30 - Evolução do critério de Detetabilidade difuso- funções de pertença para cada classificação

5.3.2. Fluxograma da metodologia *Fuzzy-FMEA*

A fim de expor o fluxograma da metodologia proposta é necessário elucidar algumas especificidades da metodologia *Fuzzy-FMEA*. Denota-se a particularidade da metodologia proposta em criar uma abordagem ao cálculo da criticidade de cada potencial modo de falha, sendo desta forma imperativo realizar a análise de cada potencial modo de falha, analisar as suas causas e efeitos consequentes e só *à posteriori* aplicar a metodologia proposta, tal como se observa na representação esquemática da Figura 31.

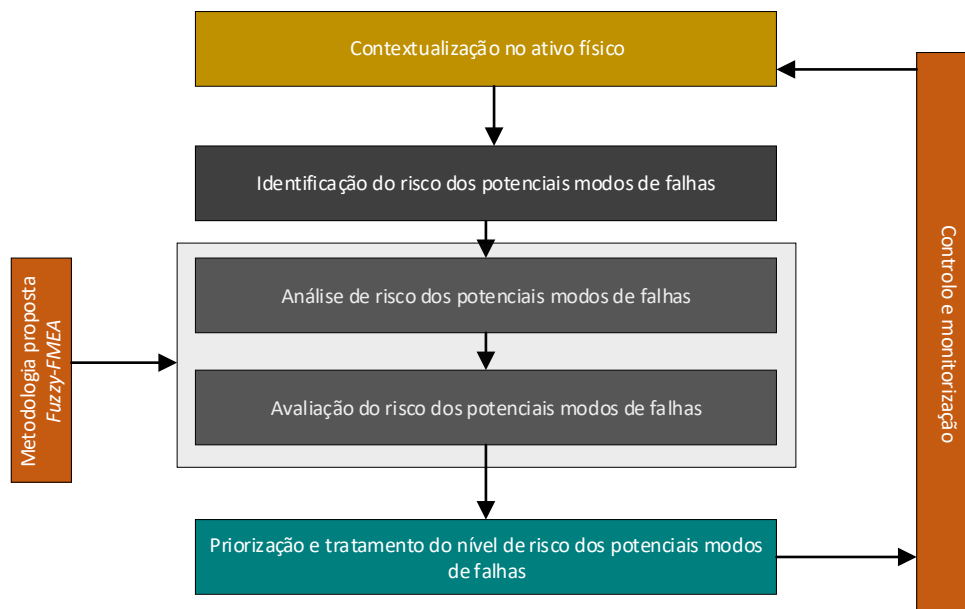


Figura 31 - Contextualização da metodologia proposta face à análise FMEA global

Na Figura 32 expõe-se o fluxograma da metodologia *Fuzzy-FMEA*. A explicação do algoritmo encontra-se evidenciada no Anexo VII e o algoritmo descrito no Anexo VIII da presente dissertação.

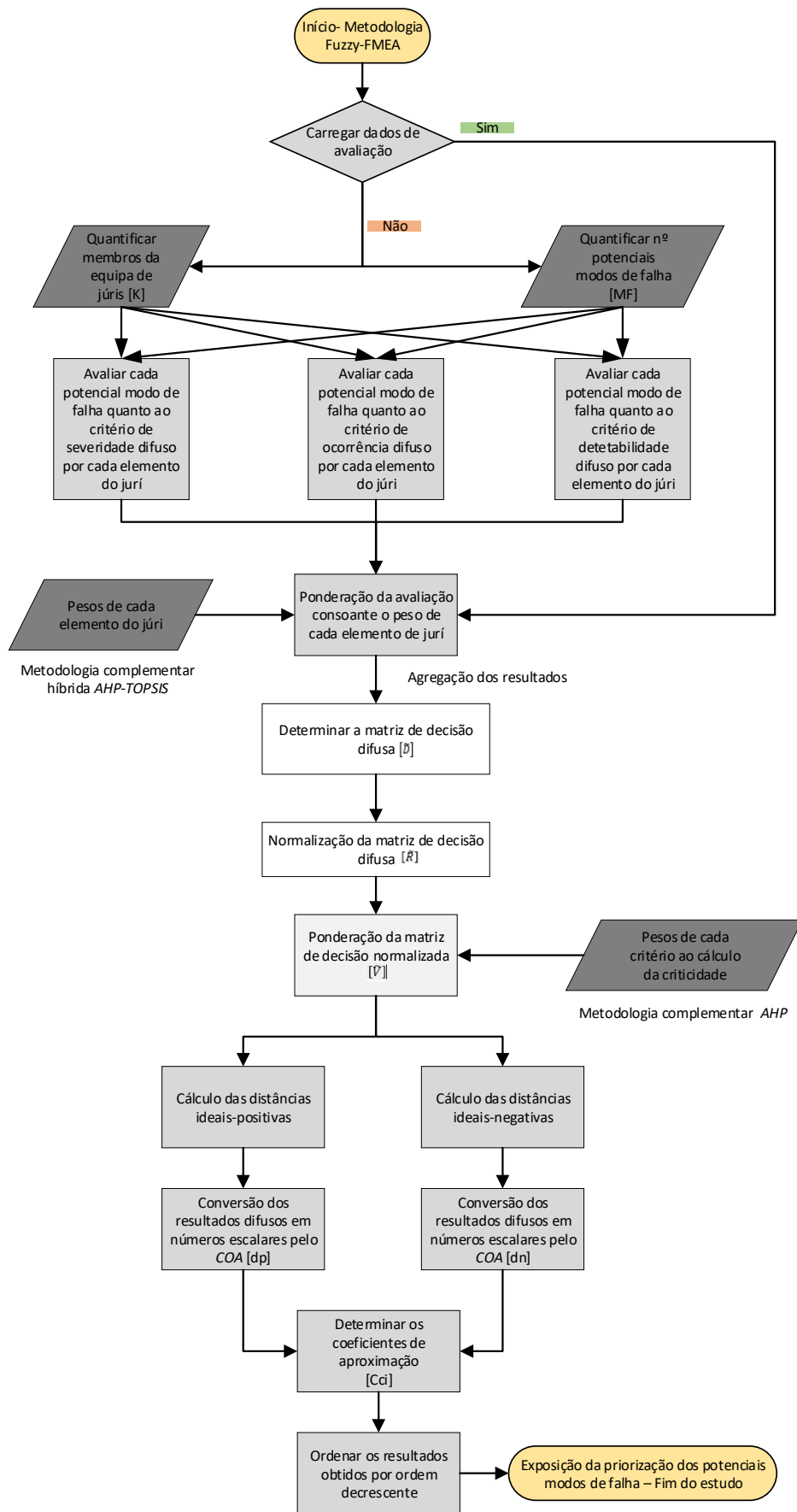


Figura 32 - Esquema da metodologia proposta Fuzzy-FMEA

6. Caso de estudo

No presente capítulo, para testar a metodologia proposta e observar os resultados obtidos, foi utilizado um estudo *FMEA* de um caso real baseado em um equipamento industrial [104], nomeadamente um secador industrial rotativo. Os secadores industriais rotativos desempenham um papel fundamental em várias indústrias, incluindo a farmacêutica, química, agrícola, alimentícia, cerâmica, papel, polímeros e indústrias de madeira e processamento [105]. A título representativo, na Figura 33 é exposto um exemplo de um secador industrial rotativo.

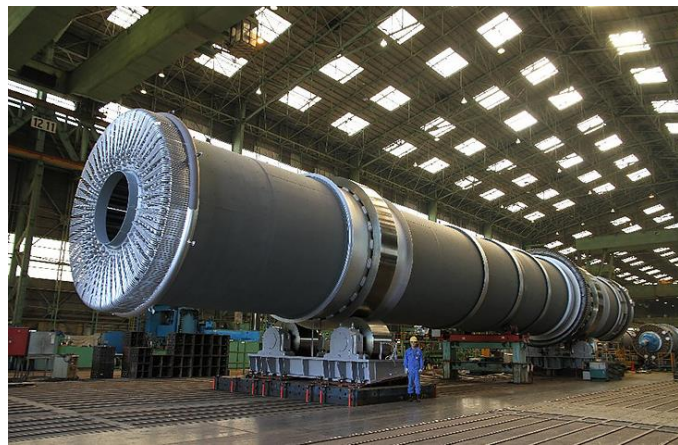


Figura 33 - Exemplo representativo do secador industrial rotativo TSK S-CD (MI-423)
(Fonte: [105])

Um secador industrial rotativo é constituído essencialmente por um tambor rotativo de aço-carbono ou aço-inoxidável, de formato cilíndrico, na posição horizontal ou ligeiramente inclinado (1 a 4 graus). O próprio tambor rotativo contém uns anéis de aço que permitem que o mesmo role sob um conjunto de rolamentos. No interior do tambor cilíndrico existem umas pás (Figura 34) que elevam o material até à parte superior do secador, que depois é libertado, entrando em contato com o fluxo de gás quente [106,107].

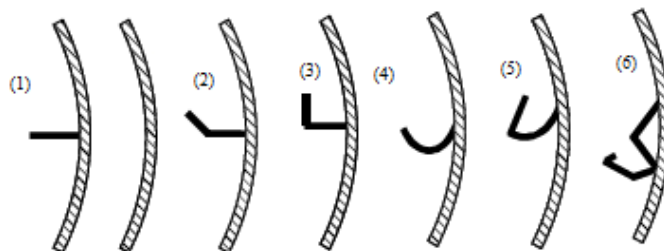


Figura 34 - Diferentes perfis de pás do tambor rotativo
(Fonte: [106])

A fim de se criar uma breve descrição do funcionamento e composição do secador industrial rotativo, na Figura 35 são identificados os itens de maior relevo ao estudo.

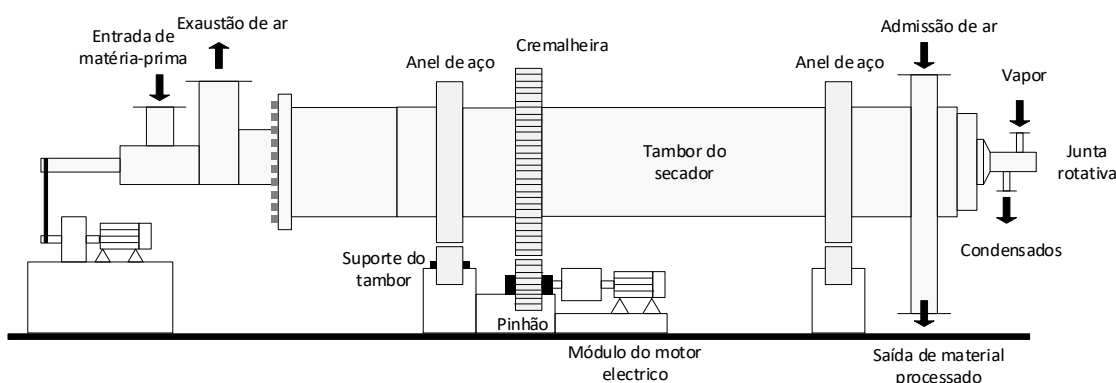


Figura 35 - Identificação dos itens relevantes de um secador industrial rotativo

O movimento rotacional é obtido por acionamento direto (pinhão e cremalheira) ou por corrente que se encontra acoplada a um motor elétrico. O tambor e os tubos de vapor funcionam como um trocador de calor rotativo, que emprega o calor latente do vapor para transferir energia para o material que está sendo processado de forma a evaporar o líquido.

A operação de secagem inicia-se com a alimentação da matéria-prima através de um parafuso ou transportador helicoidal. O fornecimento de matéria-prima criará na extremidade de descarga do secador uma camada que irá cobrir todas as linhas do tubo com o material, maximizando assim a área de contato entre o material e os tubos de vapor, resultando a secagem do mesmo.

À medida que o material entra em contato com a parte externa dos tubos, o vapor interno é condensado. Como tal, na seção de descarga do secador encontra-se presente um coletor de distribuição de vapor que distribui vapor para cada um dos tubos e que, ao mesmo tempo, recolhe os condensados resultantes do processo. Por sua vez, os gases residuais não condensáveis armazenados no interior dos tubos de vapor são expelidos por uma conexão flexível ligada a um tubo de respiro montado na extremidade de alimentação do secador.

Este sistema possui um conjunto de válvulas que permitem que os gases mais frios e não condensáveis sejam expelidos gradualmente, enquanto o vapor reside dentro dos tubos. Este modelo em estudo na presente dissertação é usado para a secagem de cristais de ácido tereftálico (CTA) ou ácido tereftálico purificado (PTA).

De um modo geral, este secador é constituído por quatro sistemas principais, o sistema principal do secador (SPS), o sistema auxiliar, o sistema de alimentação e o sistema de vedação [104]. Neste trabalho a utilização da análise *FMEA* da literatura acima citada será usada de forma parcial, ou seja, o estudo terá foco nos potenciais modos de falha do SPS, presente no Anexo IX.

O caso de estudo será subdividido em alguns tópicos de forma a corroborar a análise pretendida da metodologia proposta. Desta forma, serão apresentados 4 subcapítulos de modo a explicar o processo de como o utilizador utiliza os algoritmos criados a fim de chegar à etapa final (Figura 36). À *posteriori* é realizada uma análise de resultados da presente metodologia (último subcapítulo) com o intuito de retirar conclusões de relevo face aos resultados inicialmente obtidos pela abordagem clássica.

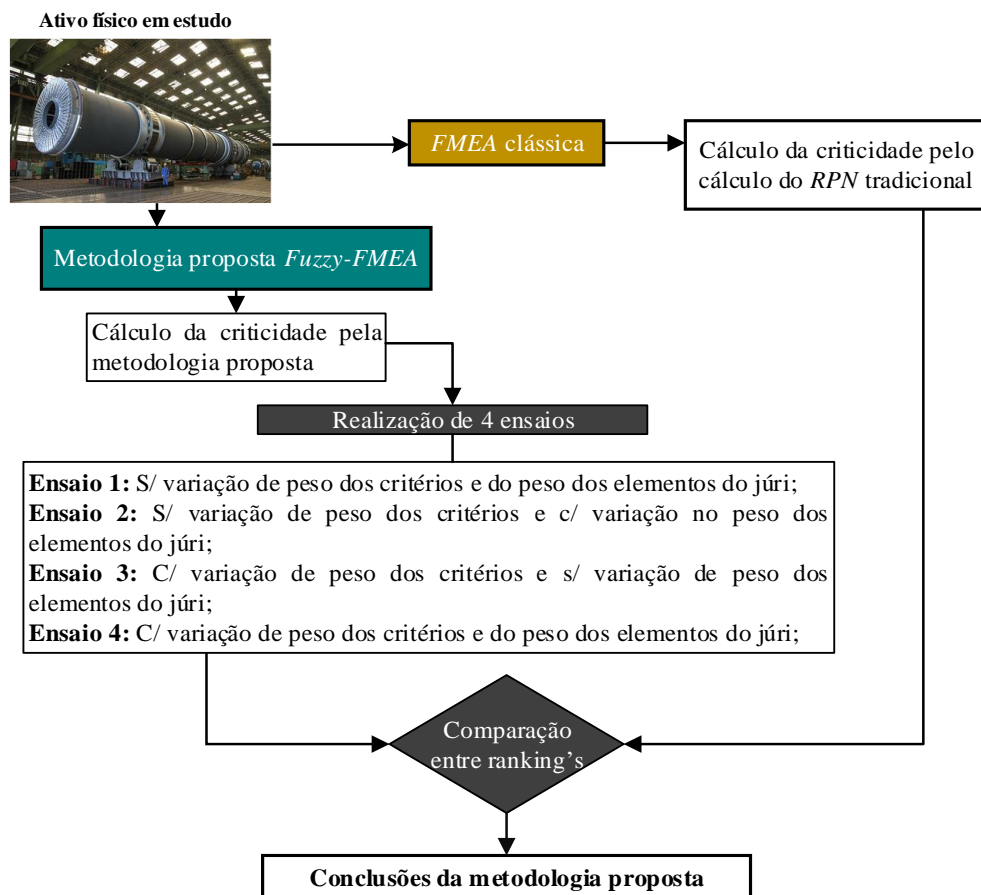


Figura 36 - Contextualização do caso de estudo aplicado à metodologia proposta

6.1. Caso de estudo – parte 1

6.1.1. Determinação do peso dos critérios de RPN

No enquadramento do caso em estudo, a determinação do peso dos critérios resulta de uma reunião entre os dois jurados com o intuito de avaliar em conjunto os critérios expostos no ponto 5.1.1 do presente trabalho. Desta forma, o primeiro passo a realizar é construir a matriz de comparação entre critérios face ao objetivo global, tal como se observa na Tabela 24.

Tabela 24 - Matriz de comparação dos critérios em relação ao objetivo global

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1.000	0.333	4.000	6.000	0.333
C2	3.000	1.000	7.000	7.000	3.000
C3	0.250	0.143	1.000	2.000	0.500
C4	0.167	0.143	0.500	1.000	0.250
C5	3.000	0.333	2.000	4.000	1.000

De seguida procede-se à normalização da matriz, na qual efetua-se a soma dos elementos em cada coluna da matriz de comparação (Tabela 25). Após esse cálculo intermédio realiza-se a divisão de cada elemento da coluna pelo resultado do somatório respeitante à coluna indicada. A matriz normalizada é evidenciada na Tabela 26.

Tabela 25 - Matriz de comparação dos critérios normalizada (passo intermédio)

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1.000	0.333	4.000	6.000	0.333
C2	3.000	1.000	7.000	7.000	3.000
C3	0.250	0.143	1.000	2.000	0.500
C4	0.167	0.143	0.500	1.000	0.250
C5	3.000	0.333	2.000	4.000	1.000
Soma	7.417	1.952	14.500	20.000	5.083

Tabela 26 - Matriz de comparação dos critérios normalizada

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	0.135	0.171	0.276	0.300	0.066
C2	0.405	0.512	0.483	0.350	0.590
C3	0.034	0.073	0.069	0.100	0.098
C4	0.023	0.073	0.035	0.050	0.049
C5	0.405	0.171	0.138	0.200	0.197

De seguida soma-se os elementos de cada linha da Tabela 26, obtendo-se desta forma o vetor de prioridades, tal como se observa na Tabela 27.

Tabela 27 - Vetor de prioridades dos critérios

	C1	C2	C3	C4	C5		Vetor de prioridades
C1	0.135	0.171	0.276	0.300	0.066	=	0.189
C2	0.405	0.512	0.483	0.350	0.590	=	0.468
C3	0.034	0.073	0.069	0.100	0.098	=	0.075
C4	0.023	0.073	0.035	0.050	0.049	=	0.046
C5	0.405	0.171	0.138	0.200	0.197	=	0.222
						Σ	1.000

Observando o vetor de prioridades resultante da Tabela 27, verifica-se o seguinte:

- O critério de Contribuição para o Lucro é o critério mais importante com 46.8%;
- O critério de Segurança é o segundo critério mais importante com 22.2%;
- O critério da Capacidade de Utilização é o terceiro critério mais importante com 18.9%;
- O critério da Capacidade de Substituição é o quarto critério mais importante com 7.5%;
- O critério da Tecnologia Incorporada é o último com 4.6%.

De seguida, é repetido o mesmo raciocínio às demais alternativas para cada critério. Nas tabelas abaixo discriminadas evidenciam-se as matrizes de comparação das alternativas e seus vetores de prioridades sem abordar de uma forma detalhada o processo de cálculo realizado.

Tabela 28 - Matriz de comparação das alternativas e respetivo vetor de prioridades em relação ao critério de Capacidade de Utilização

	C1	C2	C3		Vetor de prioridades
C1	1.000	0.333	0.500	=	0.164
C2	3.000	1.000	2.000	=	0.539
C3	2.000	0.500	1.000	=	0.297
				Σ	1.000

Tabela 29 - Matriz de comparação das alternativas e respetivo vetor de prioridades em relação ao critério de Contribuição para o Lucro

	C1	C2	C3		Vetor de prioridades
C1	1.000	3.000	2.000	=	0.525
C2	0.333	1.000	0.333	=	0.142
C3	0.500	3.000	1.000	=	0.334
				Σ	1.000

Tabela 30 - Matriz de comparação das alternativas e respetivo vetor de prioridades em relação ao critério de Capacidade de Substituição

	C1	C2	C3		Vetor de prioridades
C1	1.000	0.500	0.200	=	0.118
C2	2.000	1.000	0.250	=	0.201
C3	5.000	4.000	1.000	=	0.681
				Σ	1.000

Tabela 31 - Matriz de comparação das alternativas e respetivo vetor de prioridades em relação ao critério de Tecnologia Incorporada

	C1	C2	C3		Vetor de prioridades
C1	1.000	3.000	2.000	=	0.512
C2	0.333	1.000	0.250	=	0.128
C3	0.500	4.000	1.000	=	0.360
				Σ	1.000

Tabela 32 - Matriz de comparação das alternativas e respetivo vetor de prioridades em relação ao critério de Segurança

	C1	C2	C3		Vetor de prioridades
C1	1.000	4.000	3.000	=	0.619
C2	0.250	1.000	2.000	=	0.224
C3	0.333	0.250	1.000	=	0.156
				Σ	1.000

Após terem sido expostas as comparações entre os demais critérios e determinados os respetivos vetores de prioridades, procede-se ao cálculo do desempenho de cada alternativa face ao objetivo global. Para tal, agregam-se os vetores de prioridades obtidos anteriormente numa matriz auxiliar e realiza-se o produto com o vetor que engloba a importância de cada critério resultando o peso global de cada alternativa, tal como se observa na Tabela 33.

Tabela 33 - Pesos das alternativas face ao objetivo global

	C1	C2	C3	C4	C5		Peso relativo dos critérios	=		
A1	0.164	0.525	0.118	0.512	0.619	.	0.189		0.446	
A2	0.539	0.142	0.201	0.128	0.224		0.468		0.239	
A3	0.297	0.334	0.681	0.360	0.156		0.075		0.315	
							0.046	Σ		1.000
							0.222			

Na Figura 37 expõe-se a árvore hierárquica AHP obtida para a determinação dos pesos dos critérios de criticidade.

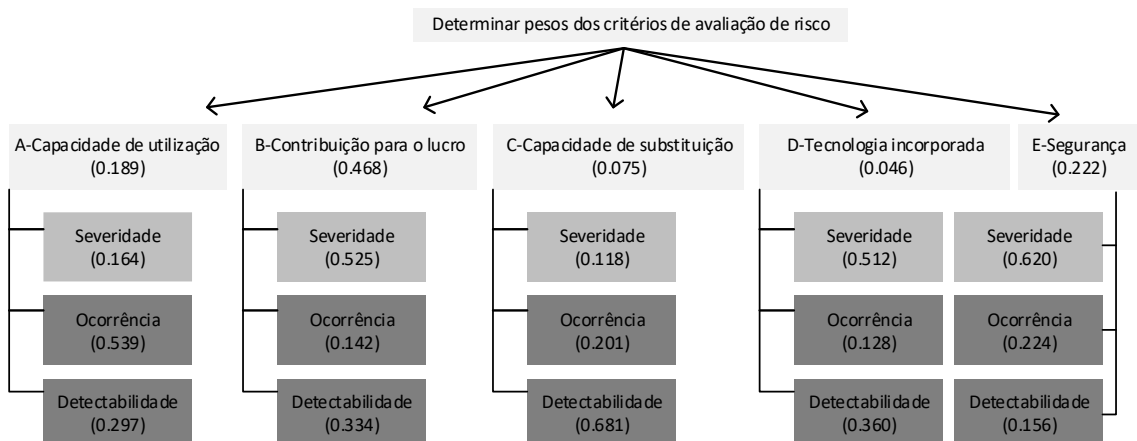


Figura 37 - Árvore hierárquica com o peso dos critérios e o peso de cada alternativa respetivo a cada critério

Consequentemente, analisando os resultados obtidos da Tabela 33, observam-se que os pesos dos critérios inerentes ao cálculo da criticidade dos potenciais modos de falha já não apresentam um peso igualitário como se verifica na FMEA clássica.

Assim, o peso de cada critério resultante da metodologia proposta (Figura 38) é:

- Critério de Severidade: peso de 44.6% na tomada de decisão;
- Critério de Ocorrência: peso de 23.9% na tomada de decisão;
- Critério de Detetabilidade: peso de 31.5% na tomada de decisão.

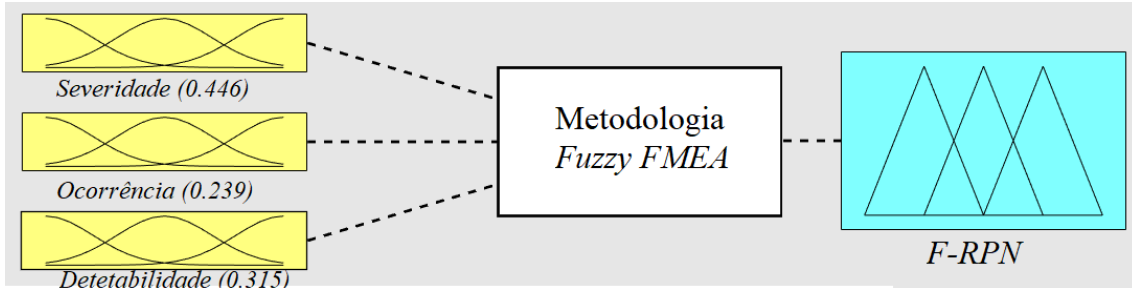


Figura 38 - Diferentes pesos dos critérios de criticidade- metodologia AHP

6.1.2. Análise da consistência lógica AHP

Indo ao encontro do algoritmo da metodologia AHP, exposto no subcapítulo 3.2.2 da presente dissertação, é necessário avaliar a consistência lógica entre as comparações par-a-par atribuídas. É evidenciada a análise de consistência lógica das comparações par-a-par entre critérios e *à posteriori* são expostos os resultados das consistências lógicas resultantes das comparações par-a-par entre as alternativas de cada critério respectivamente.

Na análise da consistência lógica das comparações par-a-par entre critérios efetua-se o produto da matriz de comparação par-a-par entre critérios com o vetor de prioridades associado (Tabela 34) e na expressão (50) segue o cálculo de λ_{max} .

Tabela 34 - Cálculos intermédios para determinar λ_{max}

	C1	C2	C3	C4	C5		Vetor de prioridades	=	
C1	1.000	0.333	4.000	6.000	0.333	·	0.189	=	0.994
C2	3.000	1.000	7.000	7.000	3.000		0.468		2.547
C3	0.250	0.143	1.000	2.000	0.500		0.075		0.392
C4	0.167	0.143	0.500	1.000	0.250		0.046		0.237
C5	3.000	0.333	2.000	4.000	1.000		0.222		1.279

$$\lambda_{max} = \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{0.994}{0.189} + \frac{2.547}{0.468} + \frac{0.392}{0.075} + \frac{0.237}{0.046} + \frac{1.279}{0.222} \right) = 5.372 \quad (50)$$

Na expressão (51) evidencia-se o cálculo do *CI*:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{5.372 - 5}{5 - 1} = 0.093 \quad (51)$$

Na expressão (52) é calculado o *CR* cujo *RI* para uma matriz de dimensão 5 é 1.12¹⁰.

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.093}{1.12} = 0.083 < 0.100 \quad (52)$$

Dado que é satisfeita a condição de Saaty [64], as comparações par-a-par entre critérios assumem a consistência lógica requerida. Na Tabela 35 são expostas as razões de consistência das comparações par-a-par entre alternativas face ao estudo em cada critério.

Tabela 35 - Razão de consistência das alternativas face aos critérios de estudo

Critérios	<i>CR</i>
Capacidade de utilização	0.008 < 0.100
Contribuição para o lucro	0.046 < 0.100
Capacidade de substituição	0.021 < 0.100
Tecnologia incorporada	0.094 < 0.100
Segurança	0.094 < 0.100

Analisando a Tabela 35, verifica-se que todas as comparações são logicamente consistentes satisfazendo a condição de consistência lógica de Saaty.

¹⁰ Consulta realizada na Tabela 9 da presente dissertação.

6.2. Caso de estudo – parte 2

6.2.1. Processo de cálculo do peso relativo aos critérios de avaliação de cada elemento do júri – metodologia AHP

No subcapítulo anterior foram expostos os passos de maior relevo para o cálculo do peso dos critérios de cálculo da criticidade abordado na metodologia proposta.

De seguida, para determinar o cálculo do peso associado a cada elemento do júri, ou seja, para determinar a contribuição de cada elemento do júri para a tomada de decisão serão apresentados os resultados de maior relevo. Não será detalhado de uma forma exaustiva dado que analogamente à metodologia complementar anterior, apresenta parte da mesma sequência de cálculos.

Assim a matriz de comparação par-a-par bem como o vetor de prioridades associado ao peso de cada critério são evidenciados na Tabela 36.

Tabela 36 - Vetor de prioridades dos critérios de avaliação de cada elemento do júri

	CT	EP	EO-C	GA		Vetor de prioridades
CT	1.000	0.200	0.500	0.500	=	0.094
EP	5.000	1.000	2.000	4.000	=	0.511
EO-C	2.000	0.500	1.000	0.500	=	0.180
GA	2.000	0.250	2.000	1.000	=	0.215
					Σ	1.000

Analisando a Tabela 36, verifica-se que:

- O critério de Experiência Profissional é o critério mais importante com um peso de 51.1%;
- O critério de Grau Académico é o segundo critério mais importante com um peso de 21.5%;
- O critério de Expressão Oral/Comunicação é o terceiro critério mais importante com um peso de 18.0%;
- O critério de Conhecimento Técnico é o quarto e último critério mais importante com um peso de 9.4%.

Dos resultados acima expostos, observa-se que o critério que apresenta menos influência é o Conhecimento Técnico. Esta influência diminuta deve-se à particularidade de, em casos pontuais, seja necessário subcontratar a assistência técnica para efetuar as diversas ações de manutenção. Desta forma o departamento de Manutenção pouco influencia em específico na manutenção do equipamento, salvo exceção, o seu planeamento e acompanhamento/controlado.

Analisando os resultados da Tabela 37, verifica-se que $CR < 0.100$, permitindo concluir que as comparações par-a-par dos critérios de avaliação da influência dos elementos do júri são logicamente consistentes.

Tabela 37 - Resultados fulcrais da análise da consistência lógica das comparações par-par entre critérios- júri

$\lambda_{máx}$	4.175
CI	0.058
CR	0.065 < 0.100

6.2.2. Processo de cálculo do peso relativo às avaliações de cada elemento do júri- metodologia TOPSIS

A aplicação da presente metodologia será desenvolvida por uma equipa composta por dois jurados (Júri 1), um Engenheiro de Manutenção (J-1) e um Engenheiro de Processo (J-2). Desta forma cada jurado, terá a sua opinião técnica e como tal deverá ser contabilizado de forma a agregar à tomada de decisão conjunta.

Na Tabela 38, segue o preenchimento da matriz de decisão de TOPSIS [D].

Tabela 38 - Matriz de decisão de TOPSIS [D]- elementos do júri

	CT	EP	EO-C	GA
J-1	4	2	5	3
J-2	3	3	2	3

De seguida, é determinada a matriz de decisão normalizada [R] (Tabela 39). O cálculo da normalização consiste no quociente de cada elemento da matriz pela norma da matriz de decisão.

Tabela 39 - Matriz de decisão normalizada de TOPSIS [R]- elementos do júri

	CT	EP	EO-C	GA
J-1	0.444	0.222	0.555	0.333
J-2	0.333	0.333	0.222	0.333

Posteriormente calcula-se a matriz de decisão ponderada [V] (Tabela 40). A ponderação da matriz de decisão normalizada resulta do produto de cada elemento da matriz [R] pelo peso do critério respetivo, determinado pela metodologia AHP (vetor de prioridades evidenciado na Tabela 36).

Tabela 40-Matriz de decisão ponderada de TOPSIS [V]- elementos do júri

	CT	EP	EO-C	GA
J-1	0.042	0.113	0.100	0.071
J-2	0.031	0.170	0.040	0.071

Após apresentar-se a matriz de decisão ponderada [V], determinam-se as distâncias ideal-positiva e as distâncias ideal-negativa (Tabela 41), de forma a determinar as distâncias respetivas respeitante a cada elemento de desempenho (Tabela 42).

Tabela 41 - Distâncias ideal-positiva e ideal-negativa respeitante a cada critério de TOPSIS

		CT	EP	EO-C	GA
J-1	A ⁺	0.042	0.170	0.100	0.071
J-2	A ⁻	0.031	0.113	0.040	0.071

Tabela 42 - Distâncias ao desempenho de cada júri face às anteriores determinadas

		CT	EP	EO-C	GA	
J-1	D ₁ ⁺	0.0000	0.0032	0.0000	0.0000	= $\sqrt{\sum D^2}$
	D ₁ ⁻	0.0001	0.0000	0.0036	0.0000	
J-2	D ₂ ⁺	0.0001	0.0000	0.0036	0.0000	
	D ₂ ⁻	0.0000	0.0032	0.0000	0.0000	
						0.0567
						0.0609
						0.0609
						0.0567

Por último é determinado o Cc_i cujo resultado de cada jurado encontra-se evidenciado na Tabela 43.

Tabela 43 - Coeficientes de aproximação de TOPSIS- elementos do júri

	Cci
J-1	0.518
J-2	0.482

Analisando os resultados da Tabela 43 verifica-se que:

- O jurado 1 (J-1) é o elemento mais importante do júri;
- O jurado 2 (J-2) é o elemento do júri menos importante (consequência obrigatória).

6.3. Caso de estudo – parte 3

Até ao presente subcapítulo foram determinados os pesos fulcrais da metodologia proposta, conforme o quadro resumo evidenciado na Tabela 44.

Tabela 44- Exposição dos pesos fulcrais à metodologia proposta Fuzzy-FMEA

Critérios			Júri	
Peso - S	Peso - O	Peso - D	Peso J-1	Peso J-2
0,446	0,239	0,315	0,518	0,482

De seguida, o utilizador introduz as avaliações respeitantes a cada potencial modo de falha de cada elemento do júri, tal como se observa na Figura 39.

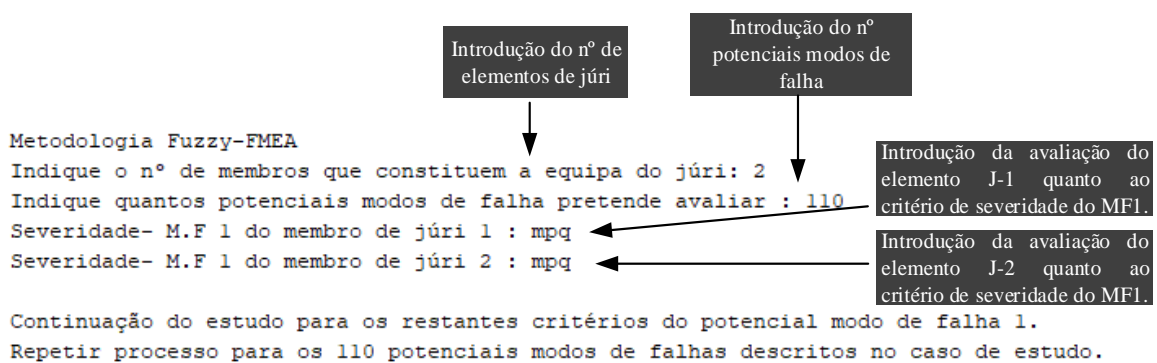


Figura 39 - Introdução da avaliação difusa de cada elemento de júri - Metodologia proposta Fuzzy-FMEA

No Anexo X são evidenciadas as avaliações atribuídas de cada elemento do júri aos demais potenciais modos de falha, salientando que cada avaliação não apresenta uma

escala quantitativa, mas sim uma escala com termos linguísticos que vão ao encontro da lógica *Fuzzy*. Tal avaliação é convertida *à posteriori* numa escala difusa conforme a Tabela 21, a Tabela 22 e a Tabela 23 que correspondem a cada critério respetivamente.

Desta forma, após o utilizador inserir as avaliações resultantes de cada elemento de júri para cada potencial modo de falha e introduzir o peso de cada critério de avaliação bem como os pesos atribuídos a cada elemento do júri, resulta a obtenção de todo o processo de cálculo dos coeficientes de aproximação dos potenciais modos de falha analisados, evidenciado no Anexo XIV.

Após o tratamento dos resultados realizado em Excel[®], destacam-se os dez potenciais modos de falha mais críticos pela metodologia proposta (Tabela 45).

Tabela 45 - Identificação dos dez potenciais modos de falha mais severos – Metodologia Fuzzy-FMEA

Pot. Modo de Falha	Cci	Ranking
110	0,256	1
74	0,246	2
80	0,225	3
72	0,217	4
73	0,217	5
25	0,216	6
79	0,214	7
109	0,210	8
30	0,206	9
21	0,201	10

6.4. Caso de estudo – análise de resultados

6.4.1. Resposta às críticas da *FMEA* tradicional

Indo ao encontro do objetivo delineado na presente dissertação, neste subcapítulo expõe-se um conjunto de evidências a fim de responder às limitações apresentadas no subcapítulo 2.5.2. A fim de se estruturarem as evidências, abaixo segue a explicação caso a caso.

- Crítica de limitação nº1 - “*Os critérios de Severidade, Ocorrência e Detetabilidade apresentam o mesmo peso, tal como se pode observar no cálculo da criticidade pelo cálculo do RPN...*”

Com a adequação da metodologia proposta *Fuzzy-FMEA* verifica-se que existe um processo de avaliação com algoritmos complementares que permitem criar uma rotina

de avaliação e respetiva quantificação quer para os critérios de avaliação de criticidade quer para o peso de cada elemento de júri, tal como se observa na Tabela 44. Desta forma a limitação acima apresentada encontra-se solucionada.

- Crítica de limitação nº2 - “...limitação da não-linearidade da escala de ocorrência, dado ser uma escala cujos índices são atribuídos segunda uma probabilidade de ocorrência, probabilidade essa cujo crescimento não é linear, levando à alteração da priorização do risco...”

A introdução da lógica *Fuzzy* permite construir uma relação de avaliação sempre associada a um universo amplo, permitindo ajustar a realidade presente. Apesar das decisões apresentarem uma evolução não-linear (pois depende da função de pertença atribuída) não existe atribuições dotadas do estado do tipo “binário”, ou seja, caso um potencial modo de falha apresente uma ocorrência¹¹ de 1:15000 ou de 1:15001, pela lógica *Fuzzy* o impacto final é pouco pronunciado comparativamente à abordagem clássica. Segundo esta mesma abordagem clássica, o impacto desta pequena variação levaria à alteração do nível de risco originando variações significativas nos resultados finais.

- Crítica de limitação nº3 – “...verifica-se que para diferentes classificações atribuídas aos critérios de Severidade, Ocorrência e Detetabilidade obteve-se o mesmo valor de RPN...”

A abordagem clássica apresenta este problema associado à insensibilidade por parte do cálculo do nível de criticidade, pois resulta do produto matemático entre o nível de Severidade, nível de Ocorrência e nível de Detetabilidade. Na Tabela 46 evidencia-se uma amostra nítida de como a metodologia proposta ultrapassa tal dificuldade.

Observando a avaliação resultante pela metodologia clássica é verificado que diferentes avaliações conduzem ao mesmo resultado. A metodologia proposta ao adequar a ponderação de pesos aos critérios de avaliação da criticidade bem como ao diferenciar as avaliações entre jurados, permite que as avaliações que inicialmente conduziriam ao mesmo nível de criticidade apresentem diferenças entre si, não sendo discutível assim a sua priorização.

¹¹ N° de ocorrências anuais.

Tabela 46 - Diferenciação do nível de criticidade pela Fuzzy-FMEA face à FMEA clássica

MF	FMEA clássica				Fuzzy-FMEA						
	S	O	D	RPN	S [J-1]	O [J-1]	D [J-1]	S [J-2]	O [J-2]	D [J-2]	Cci
26	4	2	4	32	B	PI	A	B	PI	MOD	0,11
27	4	1	8	32	PQ	MP	RII	B	MP	RII	0,16
28	4	1	8	32	MD	MP	RII	B	MP	RII	0,18

Analisando a amostra de resultados na Tabela 46, verifica-se que o modo de falha (MF) nº 26 é o menos crítico de entre os três critérios, pois como os critérios de Severidade e Detetabilidade são os que apresentam maior ponderação na decisão final, os resultados conducentes são logicamente coerentes.

A fim de desempatar os MF nº27 e MF nº28, verifica-se a necessidade de analisar em detalhe as avaliações linguísticas relativamente ao critério de Severidade do jurado 1 e do jurado 2 (relembrando que o jurado 1 apresenta uma influência ligeiramente superior ao jurado 2). Desta forma como a avaliação do jurado 1 é diferente entre os MF (Tabela 46), permite desempatar os mesmos. Em concreto, a avaliação de Severidade do jurado 1 é superior no MF nº 28. É então de concluir que a priorização destes potenciais modos de falha segundo a sua avaliação de risco se realiza da seguinte forma:

$$MF \text{ nº } 28 > MF \text{ nº } 27 > MF \text{ nº } 26$$

Comparando tais resultados com a FMEA clássica, a resolução desta limitação é um passo importante para avaliação de risco dos ativos físicos.

- Crítica de limitação nº4 – “A avaliação dos três critérios torna o processo de caracterização exaustivo levando ao aparecimento do erro humano [58] e necessita que esteja uma equipa polivalente focada nesse fim...”

A metodologia proposta é dotada de múltiplos mecanismos de *error-proofing* que tornam os algoritmos robustos face às necessidades do presente estudo. Existem rotinas de programação nos algoritmos que recusam análises que logicamente são inaceitáveis, tal como o exemplo evidenciado na Figura 40.

Matriz de comparação par-a-par normalizada-critérios:

0.1780	0.7282	0.2963	0.3333	0.0625
0.0356	0.1456	0.4444	0.2778	0.5000
0.0445	0.0243	0.0741	0.1111	0.1250
0.0297	0.0291	0.0370	0.0556	0.0625
0.7122	0.0728	0.1481	0.2222	0.2500

O peso do critério 1 é: 0.31967.
 O peso do critério 2 é: 0.28069.
 O peso do critério 3 é: 0.075793.
 O peso do critério 4 é: 0.042778.
 O peso do critério 5 é: 0.28107.

'As comparações par-a-par são inconsistentes. Refaça a matriz de comparação par-a-par.'

*Reprovação da
análise realizada*

Figura 40 - Mecanismo de error-proofing no algoritmo Fuzzy-FMEA

Em adição a presença de uma equipa polivalente permite integrar a visão técnica de cada jurado resultando um estudo mais rico. A presente metodologia apresenta um raciocínio que permite contabilizar a opinião individual dos jurados, e, aglomerando as avaliações respetivas, permite criar uma decisão única sem com isso haja conflitos de natureza laboral.

6.4.2. Ranking dos potenciais modos de falha mais críticos - ensaios

Neste subcapítulo apresentam-se os cinco potenciais modos de falha mais críticos em cada ensaio testado.

Na Figura 41 é exposto o ranking dos cinco potenciais modos de falha mais críticos do ensaio 1 da metodologia proposta.

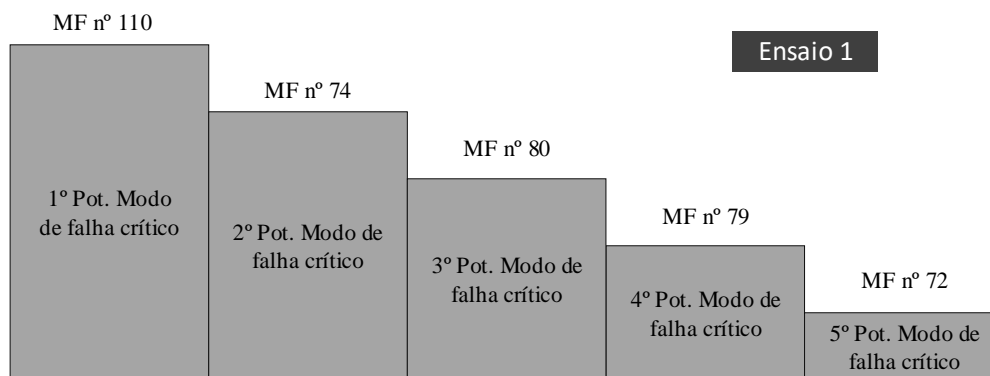


Figura 41 - Ranking dos potenciais modos de falha do ensaio 1- Metodologia Fuzzy-FMEA

Na Figura 42 é exposto o ranking dos cinco potenciais modos de falha mais críticos do ensaio 2 da metodologia proposta.

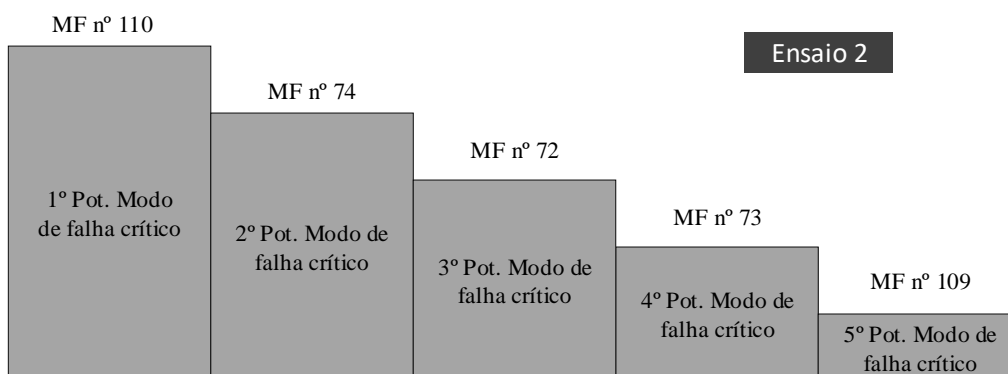


Figura 42 - Ranking dos potenciais modos de falha do ensaio 2- Metodologia Fuzzy-FMEA

Na Figura 43 é exposto o ranking dos cinco potenciais modos de falha mais críticos do ensaio 3 da metodologia proposta.

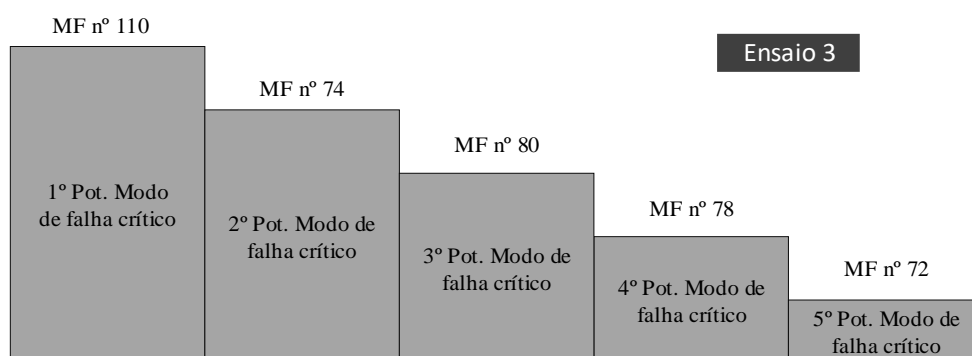


Figura 43 - Ranking dos potenciais modos de falha do ensaio 3- Metodologia Fuzzy-FMEA

Na Figura 44 é exposto o ranking dos cinco potenciais modos de falha mais críticos do ensaio 4 da metodologia proposta.

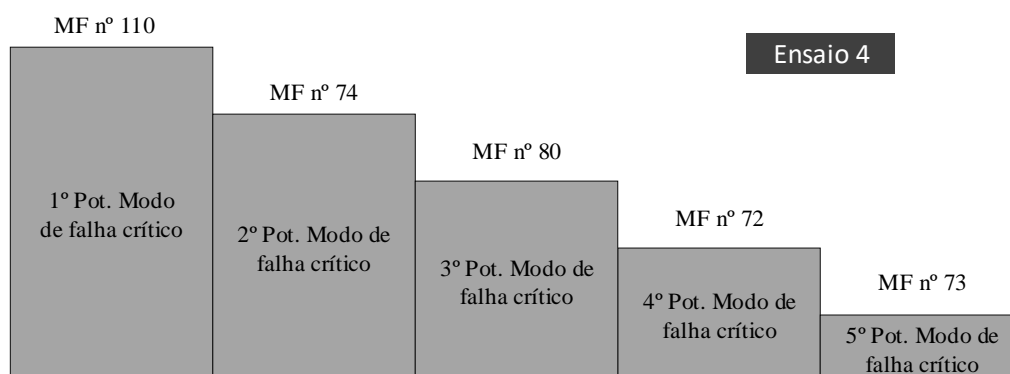


Figura 44 - Ranking dos potenciais modos de falha do ensaio 4- Metodologia Fuzzy-FMEA

Analisando o ranking dos cinco potenciais modos de falha mais críticos é notório que existem alterações dos potenciais modos de falha mais críticos a partir do terceiro nível de criticidade, tal como se observa na Tabela 47.

Tabela 47 - Ranking dos potenciais modos de falha mais críticos dos diferentes ensaios - Metodologia Fuzzy-FMEA

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Nível de criticidade	MF	MF	MF	MF
1º	110	110	110	110
2º	74	74	74	74
3º	80	72	80	80
4º	79	73	78	72
5º	72	109	72	73

Analisando os resultados acima expostos, é de verificar que a partir da terceira posição existem diferentes potenciais modos associados à posição crítica em causa, contudo o MF nº 72 (Tensões nos tubos de aquecimento devido à expansão térmica) é um potencial modo de falha de interesse ao estudo, porque em cada ensaio ocupa um nível diferente de criticidade. Estas diferenças entre cada ensaio têm em conta a adequação dos pesos quer dos critérios de avaliação da criticidade quer das avaliações dos diferentes elementos do júri, originando flutuações no resultado final.

Verifica-se quer no ensaio 2 quer no ensaio 4, que o MF nº 72 apresenta variações na posição do seu nível de criticidade quando é alterado o peso de avaliação dos respetivos critérios. Em contrapartida, quando introduzidos os pesos dos elementos de júri a sua variação é pouco significativa. Tal diferença é pouco notória porque os jurados apresentam pesos muito próximos entre si (peso do jurado nº1 – 0.518 e peso do jurado nº2 – 0.482), permitindo que no final do ensaio haja pouca variação pela adequação dos pesos dos critérios de avaliação da criticidade.

6.4.3. Comparação do ranking FMEA clássica vs Fuzzy-FMEA

É apresentada uma comparação entre os resultados obtidos pela FMEA clássica e pela metodologia proposta (ensaio 4) para os cinco potenciais modos de falha mais críticos. Tal comparação é apresentada na Figura 45.

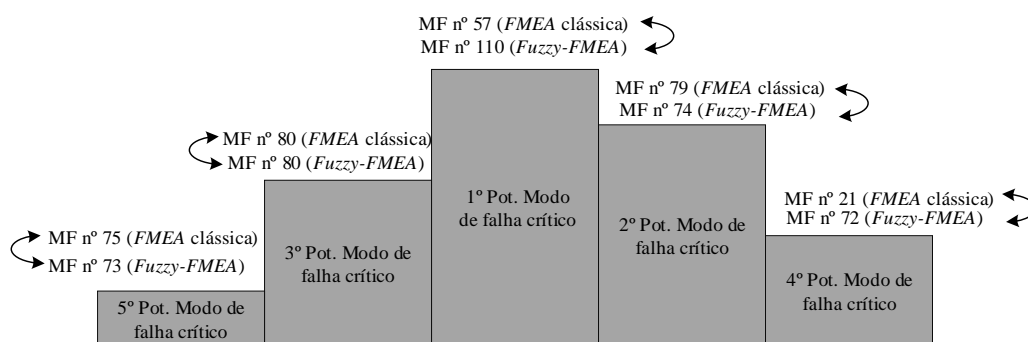


Figura 45 - Ranking dos cinco potenciais modos de falha críticos - FMEA clássica vs Fuzzy-FMEA

Analisando a Figura 45, é de verificar que os resultados finais no ranking são bastante díspares, não existindo qualquer correlação ou similaridade entre os mesmos, à exceção do terceiro potencial modo de falha. Não sendo possível retirar conclusões de imediato, será analisando caso a caso.

- **Potencial modo de falha crítico nº1 (Tabela 48):**

Tabela 48 - Comparação entre o primeiro potencial modo de falha crítico obtido na FMEA clássica vs Fuzzy-FMEA

<i>FMEA</i> clássica	MF nº57 - Corrosão por “ <i>pitting</i> ”. [Coroa dentada e pinhão]
<i>Fuzzy-FMEA</i>	MF nº110 - Subdimensionamento das fundações. [Colapso das fundações]

Analisando o primeiro potencial modo de falha crítico e dada as circunstâncias do caso de estudo aplicado à metodologia proposta (maior peso das avaliações de Severidade e Detetabilidade), tal resultado era expetável pois o MF nº110 apresenta a atribuição máxima quanto ao nível de Severidade. Desta forma enquanto na metodologia *FMEA* clássica, o MF nº57 originaria um desgaste prematuro das rodas dentadas que transmitem por sua vez o binário do motor elétrico para o tambor, na metodologia *Fuzzy-FMEA* originaria o colapso das fundações, que é altamente indesejável pois originaria danos estruturais às infraestruturas da organização, bem como danos aos equipamentos em seu redor (resultado da transmissão de vibração pelos apoios, entre outros fenómenos).

- **Potencial modo de falha crítico nº2 (Tabela 49):**

Tabela 49 - Comparação entre o segundo potencial modo de falha crítico obtido na FMEA clássica vs Fuzzy-FMEA

<i>FMEA</i> clássica	MF nº79 - Corrosão por “ <i>pitting</i> ”. [Anel do rolamento (guiado e livre)]
<i>Fuzzy-FMEA</i>	MF nº74 - Tensões nos tubos de aquecimento devido à expansão térmica. [Rotura dos tubos]

Analisando o MF nº79 da metodologia *FMEA* clássica é de verificar que o mesmo apresenta o mesmo nível de criticidade que o MF nº57, todavia como na tabela dos potenciais modos de falha surge em primeiro lugar é logicamente dedutível que seja o primeiro a ser considerado. Esta lacuna existe, dado que a *FMEA* clássica não apresenta sensibilidade para ajustar-se à realidade dos potenciais modos de falha presentes.

Em contrapartida, pela metodologia *Fuzzy-FMEA* o MF nº74 apresenta-se como o segundo potencial modo de falha crítico, pois analogamente ao MF nº110, apresenta atribuição máxima de Severidade, contudo como a Detetabilidade apresenta uma avaliação ligeiramente inferior, faz com que seja o segundo potencial modo de falha mais crítico.

Tecnicamente analisando o seu pior cenário, a falha do rolamento obrigaria à paragem imediata do equipamento, por sua vez, a rutura dos tubos obrigaria igualmente

a paragem imediata do equipamento, com o risco acrescentado de perigo aos colaboradores e meios em seu redor.

- **Potencial modo de falha crítico nº3 (Tabela 50):**

Tabela 50 - Comparação entre o terceiro potencial modo de falha crítico obtido na FMEA clássica vs Fuzzy-FMEA

<i>FMEA clássica</i>	MF nº80 - Desalinhamento vertical e horizontal. [Anel de rolamento]
<i>Fuzzy-FMEA</i>	

Analisando o terceiro potencial modo de falha crítico, verifica-se que apresenta em ambas metodologias o mesmo potencial modo de falha, o MF nº 80. Apesar de ser um potencial modo de falha que numa primeira fase não origina um impacto catastrófico imediato, a ausência de uma resolução corretiva origina consequente acumulação de danos em diversos subconjuntos/peças do equipamento. Para além da falha direta do desgaste do anel do rolamento, destaca-se os seguintes:

- (1) Variações no processo produtivo, pois um desalinhamento em diferentes vertentes, poderá promover uma secagem ineficiente da matéria-prima em processamento;
- (2) Os parafusos de fixação às fundações ficam sujeitos a tensões de corte e tensões de tração-compressão cíclicas que podem originar a rutura dos mesmos;
- (3) Solicitação de picos de potência ao motor elétrico podendo queimar o mesmo;
- (4) Desgaste acentuado dos dentes das engrenagens que transmitem o binário motriz ao tambor, e num cenário mais pessimista a fratura de dentes da própria engrenagem;
- (5) Outros danos acumulados motivados pelo desalinhamento.

- **Potencial modo de falha crítico nº4 (Tabela 51):**

Tabela 51 - Comparação entre o quarto potencial modo de falha crítico obtido na FMEA clássica vs Fuzzy-FMEA

<i>FMEA clássica</i>	MF nº21 - Desalinhamento do veio. [Falha dos rolamentos]
<i>Fuzzy-FMEA</i>	MF nº72 - Tensões nos tubos de aquecimento devido à expansão térmica. [Deterioração do tambor]

Analisando o quarto potencial modo de falha crítico obtido para as metodologias expostas verifica-se uma analogia ao segundo potencial modo de falha crítico, pois dada a existência de uma maior influência do critério da Severidade, para os potenciais modos

de falha que apresentem avaliações de maior classificação quanto ao seu critério de Severidade é expectável que sejam priorizados, como é apresentado neste caso.

- **Potencial modo de falha crítico nº5 (Tabela 52):**

Tabela 52 - Comparação entre o quinto potencial modo de falha crítico obtido na FMEA clássica vs Fuzzy-FMEA

<i>FMEA</i> clássica	MF nº75 - Corrosão-erosão. [Rutura dos tubos]
<i>Fuzzy-FMEA</i>	MF nº 73 - Tensões no tambor devido à expansão térmica. [Deterioração do tambor]

Analisando o quinto e último potencial modo de falha crítico obtido para as metodologias expostas verifica-se que ambos os potenciais modos de falha estão associados ao conjunto do tambor do secador, e relacionados igualmente com o problema da expansão térmica do sistema quando em funcionamento.

A priorização do MF nº 73 pela metodologia *Fuzzy-FMEA* em detrimento do MF nº 75, deve-se ao facto de ser mais difícil a deteção de tensões acumuladas no tambor devido à expansão térmica face à corrosão-erosão presente ao longo das tubagens. Os fenómenos de corrosão-erosão das tubagens do secador torna-se mais fáceis em detetar, pois é usual os filtros dotarem de elementos magnetizados que acumulam as partículas podendo ser facilmente detetado nas intervenções de manutenção.

7. Conclusões e trabalhos futuros

7.1. Conclusões

Durante a elaboração deste trabalho foi delineada a implementação de uma ferramenta que permitisse superar/responder algumas das limitações da metodologia *FMEA* clássica. O motivo pelo qual existe a necessidade de melhorar a metodologia deveu-se à presença de certas limitações no seu processo de quantificação do nível *RPN* em particular. Excluindo essas limitações, trata-se de uma metodologia eficaz na exploração do processo/equipamento em estudo permitindo conhecer tal processo/equipamento com o grau de profundidade pretendido. Desta forma, todos os intervenientes têm acesso a oportunidades de estudar melhor o funcionamento do ativo físico, detetando conseqüentemente problemas que noutra contexto seria difícil ter como base um ponto de partida à resolução desses problemas.

Após uma pesquisa exaustiva de trabalhos desenvolvidos em matéria de tomada de decisão baseada em multicritérios e a criação de um compromisso único em agregar as metodologias *AHP* e *TOPSIS* à capacidade de quantificar a incerteza e erro humano pela lógica *Fuzzy*, delineou-se a construção de um modelo denominado de *Fuzzy-FMEA*.

Após a construção da metodologia proposta, esta foi aplicada a um caso de estudo de um equipamento industrial e, para testar a robustez da mesma, foram elaborados alguns ensaios experimentais. Verificou-se que tal metodologia proposta quantifica o interesse único em cada contexto, ou seja, a própria ferramenta adapta-se matematicamente às diferentes realidades, pois revela passos importantes no seu desenvolvimento que considera aspetos importantes à tomada de decisão, bem como a agregação de diferentes opiniões numa única decisão final, evitando assim a existência de conflitos de interesses durante o processo. É possível concluir que se trata de uma ferramenta expedita à realidade do mercado de trabalho, pois contabiliza as dificuldades sentidas no quotidiano do mesmo.

Em detalhe do caso de estudo, o critério que apresenta uma influência superior face aos restantes é o critério de Severidade. A priorização dos potenciais modos de falha foi gerida tendo em consideração tal premissa, resultando numa priorização díspar da priorização obtida pela metodologia clássica. Desta forma, os potenciais modos de falha críticos no caso de estudo foram relacionados com aspetos estruturais (fundações de suporte e deterioração do tambor) bem como uma degradação intensa/rutura das tubagens

do equipamento motivadas por fenómenos de expansão térmica, que apresentam avaliações elevadas no critério de Severidade.

Em matéria de dificuldades sentidas ao longo do trabalho foram detetadas sérias dificuldades no domínio da programação em *Matlab*. Considero que essas dificuldades se basearam no facto de que os conhecimentos que o autor apresenta em linguagem de programação de *Matlab* são suficientes para a elaboração de aplicações que apoiem o quotidiano de um engenheiro mecânico, contudo em certas operações lógicas foi necessário pesquisar e testar de uma forma exaustiva até ao instante que os algoritmos criados iam ao encontro dos objetivos do autor da presente dissertação. No domínio da linguagem de programação a maior dificuldade foi a adequação e conversão de estruturas de armazenamento de dados do tipo *matrix* para *cell array*, necessária nos passos intermédios presentes na metodologia proposta até chegar aos resultados pretendidos.

Outra dificuldade sentida foi a introdução das avaliações dos demais elementos do júri pelos potenciais modos de falha do caso de estudo, pois verifica-se que no processo de introdução de dados a presença de erros de natureza humana, originaria a uma inconsistência lógica que por sua vez a rotina do algoritmo obriga à reintrodução dos dados. Este processo inerente à reinserção de dados, torna-se por vezes exaustivo em estudos de maior complexidade podendo gerar alguma controvérsia entre utilizadores da aplicação proposta. A fim de contornar esta dificuldade, foram criadas matrizes auxiliares e introduzidas no algoritmo *à posteriori* de modo a minimizar tal exaustão do processo.

Com a elaboração da presente dissertação e após as dificuldades superadas, foi notória a construção de uma metodologia que adiciona valor à metodologia *FMEA* clássica na medida que permite responder a certas limitações que apresenta bem como permite ter uma ferramenta ajustável às necessidades dos estudos a elaborar, a fim de se constituir como uma ferramenta útil à avaliação do risco dos ativos físicos presentes que contribuem diariamente às necessidades da nossa sociedade.

7.2. Trabalhos futuros

O trabalho desenvolvido surge como um passo importante na medida em que se apresenta como uma estratégia de melhoria da metodologia *FMEA* clássica. Para superar algumas das dificuldades observadas e minimizar a complexidade de introdução dos dados que os próprios algoritmos solicitam em modo *Run* são realizadas algumas

propostas que visam melhorar a metodologia *Fuzzy-FMEA* tornando-a mais acessível a todos os elementos do júri permitindo criar análises mais enriquecedoras no domínio da avaliação de risco. Desta forma são propostos os seguintes desenvolvimentos futuros:

- Criar uma *Graphical User Interface* (GUI) em *Matlab* de modo a dinamizar o processo de introdução das avaliações respetivas;
- Criar uma aplicação que funcionasse em sistemas operativos de *smartphones-tablets* onde todo e qualquer colaborador (que constituísse como elemento do júri) possa realizar as avaliações dos potenciais modos de falha junto dos seus postos de trabalho, e posteriormente a existência de um tratamento por parte da aplicação em enviar a informação ao algoritmo da *Fuzzy-FMEA*. Tornar-se-ia assim, um processo mais interativo na medida que cada elemento do júri daria a sua avaliação no seu contexto de trabalho, e numa fase posterior reuniam-se para desencadear as ações corretivas. Esta melhoria incrementaria significativamente a manutenção dos equipamentos, pois existia uma gestão da informação importante e credível sem que com isso afetasse ou criasse mais processos técnico-administrativos ao quotidiano laboral dos demais elementos do júri;
- Enquadrar a metodologia proposta num módulo das aplicações comerciais de gestão de manutenção convencional;
- Elaborar uma bateria de ensaios mais intensiva na medida de estudar o comportamento da metodologia proposta a diferentes contextos, bem como de detetar eventuais limitações da metodologia *Fuzzy-FMEA*, não evidenciadas neste trabalho.

Referências bibliográficas

- [1] Gulati, R. (2012), *Maintenance and Reliability Best Practices*, 2nd Edition, New York: Industrial Press, Inc..
- [2] Pariazar, M., Shahrabi, J. Zaeri, M. S. and Parhizi, S. (2008), “A combined approach for maintenance strategy selection”, *J. Appl. Sci.*, vol. 8, no. 23, pp. 4321–4329.
- [3] Luxhøj, J. T., Riis, J.O. and Thorsteinsson, U. (1997), “Trends and Perspectives in Industrial Maintenance Management”, *J. Manuf. Syst.*, vol. 16, no. 6, pp. 437–453.
- [4] Possan, E. and Demoliner, C.A. (2013), “Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: abordagem geral”, *Revista técnico-científica CREA-PR*, vol. 1, pp. 1–18.
- [5] Lipol, L. S. and Haq, J. (2011), “Risk analysis method: FMEA/FMECA in the organizations”, *Int. J. Basic Appl. Sci.*, vol. 11, no. 5, pp. 74–82.
- [6] DOD (1980), MIL-STD-1629A- Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis. Washington Dc, 1980.
- [7] BSI (2010), BS EN 13306:2010, Maintenance-Maintenance terminology., CEN, Brussels.
- [8] CEI (2006), IEC 60812:2006, Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA), Switzerland.
- [9] Chanamool, N. and Naenna, T. (2016), “Fuzzy FMEA Application to Improve Decision-Making Process in an Emergency Department”, *Applied Soft Computing Journal*, vol.43, pp.1-43.
- [10] Wang, H., Zhang, Y. M. and Yang, Z. (2019), “A risk evaluation method to prioritize failure modes based on failure data and a combination of fuzzy sets theory and grey theory”, *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 82, no. 11, pp. 216-225.
- [11] Balaraju, J., Raj, M. G. and Murthy, C. S. N. (2019), “Fuzzy-FMEA Risk Evaluation Approach for LHD Machine”, *Journal of Sustainable Mining*, vol.18, no. 4, pp.257-268.
- [12] Chin, K. S., Wang, Y. M., Poon, G. K. K. and Yang, J. B. (2009), “Failure mode and effects analysis by data envelopment analysis”, *Decision Support Syst.*, vol. 48, no. 1, pp. 246–256.
- [13] Yeh, R. H. and Hsieh, M. H. (2010), “Fuzzy assessment of FMEA for a sewage plant”, *J. Chinese Inst. Ind. Eng.*, vol. 24, no. 6, pp. 505-512.
- [14] Carpitella, S., Certa, A., Izquierdo, A. J. and La Fata, C. M. (2018), “A combined multi-criteria approach to support FMECA analyses: A real-world case”, *Reliability Eng. and System Safety*, vol.169, pp. 394-402.
- [15] Certa, A., Enea, M. and Lupo, T. (2013), “Electre III to dynamically support the decision maker about the periodic replacements configurations for a multi-component system”, *Decis. Support Syst.*, vol. 55, no. 1, pp. 126-134.
- [16] Walker, B. (2010), “Deepwater Horizon oil spill”, in *Journal of Environmental Health*, vol. 73, no. 4, Encyclopedia Britannica, Inc., p. 10.

- [17] Pillay, A. and Wang, J. (2002), “Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning”, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 79, no. 2003, pp. 69–85.
- [18] Spreafico, C., Russo, D. and Rizzi, C. (2017), “A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents”, *Comput. Sci. Rev.*, vol. 25, pp. 19–28.
- [19] Puente, J., Pino, R., Priore, P. and de la Fuente, D. (2002), “A decision support system for applying failure mode and effects analysis”, *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, vol. 19, no. 2, pp. 137–150.
- [20] Coutinho, J. de S. (1964), “Failure-Effect analysis”, *Division of Engineering of NASA*, vol.1, p.21.
- [21] Bosch, V. G. and Enríquez, F. T. (2005), “TQM and QFD: Exploiting a customer complaint management system”, *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, vol. 22, no. 1, pp. 30–37.
- [22] Hassan, A., Siadat, A., Dantan, J. Y., and Martin, P. (2010), “Conceptual process planning an improvement approach using QFD, FMEA, and ABC methods”, *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 26, no. 4, pp. 392–401.
- [23] Tanik, M. (2010), “Improving ‘order handling’ process by using QFD and FMEA methodologies: A case study”, *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, vol. 27, no. 4, pp. 404–423.
- [24] Teng, S. G., Ho, S., Shumar, M. D. and Liu, P. C. (2006), “Implementing FMEA in a collaborative supply chain environment”, *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, vol. 23, no. 2, pp. 179-196.
- [25] Bertolini, M., Braglia, M., Carmignani, G. (2006), “An FMECA-based approach to process analysis”, *Int. J. Process Manag. Benchmarking*, vol. 1, no. 2, pp. 127–145.
- [26] Arvanitoyannis, I. S., Palaiokostas, C. and Panagiotaki, P. (2009), “A comparative presentation of implementation of ISO 22000 versus HACCP and FMEA in a small size Greek factory producing smoked trout: A case study”, *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 49, no. 2, pp. 176–201.
- [27] Shahin, A. (2004), “Integration of FMEA and the Kano model: An exploratory examination”, *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, vol. 21, no. 7, pp. 731–746.
- [28] Bariani, P. F., Berti, G. A., Lucchetta, G. (2004), “A combined DFMA and TRIZ approach to the simplification of product structure”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 218, no. 8, pp. 1023–1027.
- [29] Ilangkumaran, M., Thamizhselvan, P. (2010), “Integrated hazard and operability study using fuzzy linguistics approach in petrochemical industry”, *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, vol. 27, no. 5, pp. 541–557.
- [30] Chang, D. S. and Sun, K. L. P. (2009), “Applying DEA to enhance assessment capability of FMEA”, *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, vol. 26, no. 6, pp. 629–643.
- [31] Devadasan, S. R., Muthu, S., Samson, R. N., Sankaran, R. A. (2003), “Design of total failure mode and effects analysis programme”, *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, vol. 20, no. 5, pp. 551–568.
- [32] Parkinson, H. J. and Thompson, G. (2004), “Systematic approach to the planning and execution of product remanufacture”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E J. Process Mech. Eng.*, vol. 218, no. 1, pp. 1–14.

- [33] Sawhney, R., Subburaman, K. C., Sonntag, P. R., Rao, V. and Capizzi, C. (2010), “A modified FMEA approach to enhance reliability of lean systems”, *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, vol. 27, no. 7, pp. 832–855.
- [34] Zakarian, A., Wickett, P., Siradeghyan, Y. (2006), “Quantitative model for evaluating the quality of an automotive business process”, *Int. J. Prod. Res.*, vol. 44, no. 6, pp. 1055–1074.
- [35] Eubanks, C. F., Kmenta, S., Ishii, K. (1996), “System Behavior modeling as a basis for advanced failure modes and effects analysis”, *Proc. 1996 ASME Comput. Eng. Conf.*, vol. 18, no. 22, pp. 1–8.
- [36] Adamyan, A., He, D. (2004), “System failure analysis through counters of Petri net models”, *Qual. Reliab. Eng. Int.*, vol. 20, no. 4, pp. 317–335.
- [37] Tso, K. S., Tai, A. T., Chau, S. N. and Alkalai, L. (2005), “On automating failure mode analysis and enhancing its integrity”, *11th Pacific Rim Int. Symp. Dependable Comput.*, vol. 2005, pp. 287–292.
- [38] Saulino, M. F., Patel, T., Fisher, S. P. (2017), “The Application of Failure Modes and Effects Analysis Methodology to Intrathecal Drug Delivery for Pain Management”, *Neuromodulation Technol. Neural Interface*, vol. 20, no. 2, pp. 177–186.
- [39] Sutrisno, A. and Lee, T. (2012), “Service reliability assessment using failure mode and effect analysis (FMEA): survey and opportunity roadmap”, *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 7, pp. 25–38.
- [40] Gozali, L., Lieanda, K., Jap, L. and Daywin, F. J. (2019), “Analysis of Mak Diesel Engine Services at Merawang Power Plant Using FMEA Method”, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 508, no. 1.
- [41] Stamatis, D. H. (2014), *Introduction to Risk and Failures: Tools and Methodologies*, Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [42] Schneider, H. and Stamatis, D. H. (1996), *Failure Mode and Effect Analysis, FMEA from Theory to Execution*, Wisconsin: Quality Press.
- [43] Company, Ford Motor (2011), *FMEA Handbook Version 4.2*, Dearborn: Ford Motor Company.
- [44] Reason, J. (1997), *Managing the Risks of Organizational Accidents*, New York: Routledge- Francis & Taylor Group.
- [45] França, J. and Santos, I. (2014), “Fatores Humanos e Gestão de Riscos Offshore”, *Rio Oil Gas Expo Conf.*, p. 10.
- [46] Nazeri, A. and Naderikia, R. (2017), “A new fuzzy approach to identify the critical risk factors in maintenance management”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 92, no. 9–12, pp. 3749–3783.
- [47] Nie, W., Liu, W., Wu, Z., Chen, B. and Wu, L. (2019), “Failure mode and effects analysis by integrating Bayesian fuzzy assessment number and extended gray relational analysis-technique for order preference by similarity to ideal solution method”, *Qual. Reliab. Eng. Int.*, pp. 1–22.
- [48] Chang, K. H. and Cheng, C. H. (2010), “A risk assessment methodology using intuitionistic fuzzy set in FMEA”, *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 41, no. 12, pp. 1457–1471.

- [49] Arabian-Hoseynabadi, H., Oraee, H. and Tavner, P. J. (2010), “Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for wind turbines”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 32, no. 2010, pp. 817–824.
- [50] Moura, C. (2000), *Manual da FMEA equivalente a SAE J1739*, Brasil: Instituto da Qualidade Automotiva.
- [51] Santos, C. D. P. (2008), “Proposta de Implementação de uma FMEA no forno de vapor TEKA”, Universidade de Aveiro.
- [52] Lipol, L. S. and Haq, J. (2011), “Risk analysis method: FMEA / FMECA in the organizations.”, *Int. J. Basic Appl. Sci.*, vol. 11, no. 5, pp. 1–9.
- [53] Mutlu, N. G. and Altuntas, S. (2019), “Risk analysis for occupational safety and health in the textile industry: Integration of FMEA, FTA, and BIFPET methods”, *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 72, pp. 222–240.
- [54] Franceschini, F. and Galetto, M. (2001), “A new approach for evaluation of risk priorities of failure modes in FMEA”, *Int. J. Prod. Res.*, vol. 39, no. 13, pp. 2991–3002.
- [55] Liu, H. C., Chen, X. Q., Duan, C. Y. and Wang, Y. M. (2019), “Failure mode and effect analysis using multicriteria decision-making methods: A systematic literature review”, *Comput. Ind. Eng.*, vol. 135, pp. 881–897.
- [56] Deng, H. X. and Jiang, W. (2017), “Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy measure and fuzzy integral”, *Symmetry (Basel)*, vol. 9, no. 162, pp. 1–13.
- [57] Gargama, H. and Chaturvedi, S. K. (2011), “Criticality assessment models for failure mode effects and criticality analysis using fuzzy logic”, *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 60, no. 1, pp. 102–110.
- [58] Trammell, S. R., Lorenzo, D. K. and Davis, B. J. (2003), “Integrated hazards analysis: Using the strengths of multiple methods to maximize effectiveness”, *ASSE Professional Development Conference and Exposition 2003*, no. 652, pp. 1–13.
- [59] Koksalan, M., Wallenius, J. and Zionts, S. (2013), “An Early History of Multiple Criteria Decision Making”, *J. Multi-Criteria Decis. Anal.*, vol. 89, no. 6, pp. 205–229.
- [60] Yu, P. L. and Chen, Y.C. (2010), *Trends in multiple criteria decision analysis*, New York: Springer.
- [61] Wolnowska, A. E. and Konicki, W. (2019), “Multi-criterial analysis of oversize cargo transport through the city, using the AHP method”, *Transp. Res. Procedia*, vol. 39, no. 2018, pp. 614–623.
- [62] Saaty, T. L. (2008), “Decision making with the Analytic Hierarchy Process”, *Sci. Iran.*, vol. 9, no. 3, pp. 215–229.
- [63] Vargas, L. G. (1990), “An overview of the analytic hierarchy process and its applications”, *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 48, no. 1, pp. 2–8.
- [64] Saaty, R. W. (1987), “The analytic hierarchy process-what it is and how it is used”, *Math. Model.*, vol. 9, no. 3–5, pp. 161–176.
- [65] Improta, G., Russo, M. A., Triassi, M., Converso, G., Murino, T., Santillo, L. C. (2018), “Use of the AHP methodology in system dynamics: Modelling and

- simulation for health technology assessments to determine the correct prosthesis choice for hernia diseases”, *Mathematical Biosciences*, vol. 299, pp. 19–27.
- [66] Bian, T., Hu, J. and Deng, Y. (2017), “Identifying influential nodes in complex networks based on AHP”, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 479, pp. 422–436.
- [67] Holder, R. D. (1990), “Some comments on the Analytic Hierarchy Process”, *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 41, no. 11, pp. 1073–1076.
- [68] Oguztimur, S. (2015), “Why fuzzy analytic hierarchy process approach for transport problems?”, 51st Congress of the European Regional Science Association: "New Challenges for European Regions and Urban Areas in a Globalised World", Louvain-la-Neuve: European Regional Science Association (ERSA), pp.1-20.
- [69] Skibniewski, M. J. and Chao, L. C. (1992), “Evaluation of advanced construction technology with AHP method”, *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 118, no. 3, pp. 577–593.
- [70] Hein, N., Kroenke, A., Junior, M. R., Corrente, P. D. (2008), “Análise de áreas para construção de conjuntos habitacionais - Um modelo matemático para a reconstrução”, *EREMATSUL - Encontro Regional de Estudantes de Matemática do Sul XVI*, pp. 80-90.
- [71] Donegan, H. A. and Dodd, F. J. (1991), “A note on saaty’s random indexes”, *Math. Comput. Model.*, vol. 15, no. 10, pp. 135–137.
- [72] Tsai, S. B., Zhou, J., Gao, Y., Wang, J., Li, G., Zheng, Y. et al. (2017), “Combining FMEA with DEMATEL models to solve production process problems”, *PLoS One*, vol. 12, no. 8, pp. 1–15.
- [73] Si, S. L., You, X. Y., Liu, H. C. and Zhang, P. (2018), “DEMATEL Technique: A Systematic Review of the State-of-the-Art Literature on Methodologies and Applications”, *Math. Probl. Eng.*, vol. 2018, no. 1.
- [74] Lee, Y. C., Chu, W. H., Chen, Q. Tsai, S. B., Wang, J. and Dong, W. (2016), “Integrating decision-making trial and evaluation laboratory model and failure mode and effect analysis to determine the priority in solving production problems”, *Adv. Mech. Eng.*, vol. 8, no. 4, pp. 1–12.
- [75] Qu, Q., Chen, K. Y., Wei, Y. M., Liu, Y., Tsai, S. B. and Dong, W. (2015), “Using hybrid model to evaluate performance of innovation and technology professionals in marine logistics industry”, *Math. Probl. Eng.*, vol. 2015, pp. 1–8.
- [76] Hwang, C.-L. and Yoon, K. (1981), “Multiple Attributes Decision Making Methods and Applications”, in *Multiple Attribute Decision Making*, Berlin: Springer-Verlag, pp. 58–191.
- [77] Behzadian, M., Khanmohammadi Otaghsara, S., Yazdani, M. and Ignatius, J. (2012), “A state-of the-art survey of TOPSIS applications”, *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 17, pp. 13051–13069.
- [78] Ghosh, A., Mal, P., Majumdar, A., Ghosh, A., Mal, P. and Majumdar, A. (2019), “Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)”, *Adv. Optim. Decis. Tech. Text. Manuf.*, vol. 7, pp. 35–63.

- [79] Vahdani, B., Salimi, M. and Charkhchian, M. (2014), “A new FMEA method by integrating fuzzy belief structure and TOPSIS to improve risk evaluation process”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 2015, no. 77, pp. 357–368.
- [80] Salih, M. M., Zaidan, B. B., Zaidan, A. A. and Ahmed, M. A. (2019), “Survey on fuzzy TOPSIS state-of-the-art between 2007 and 2017”, *Comput. Oper. Res.*, vol. 104, pp. 207–227.
- [81] Alberto, L., Rangel, D., Hall, J. and Zotes, L. P. (2017), “Aplicação do método Topsis na avaliação dos critérios utilizados na seleção de docentes em uma instituição de ensino superior Application of the TOPSIS method in the evaluation of the criteria used in the selection of teachers in a higher education institute”, *Conhecimento Divers.*, vol. 9, no. 19, pp. 47–58.
- [82] Lima, F. R. and Carpinetti, L. C. R. (2015), “Uma comparação entre os métodos TOPSIS e Fuzzy-TOPSIS no apoio à tomada de decisão multicritério para seleção de fornecedores”, *Gest. e Prod.*, vol. 22, no. 1, pp. 17–34.
- [83] Mardani, A., Zavadskas, E. K., Govindan, K., Senin, A. A. and Jusoh, A. (2016), “Vikor technique: A systematic review of the state-of-the-art literature on methodologies and applications”, *Sustain.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–38.
- [84] Opricovic, S. and Tzeng, G. H. (2007), “Extended Vikor method in comparison with outranking methods”, *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 178, no. 2, pp. 514–529.
- [85] Opricovic, S. and Tzeng, G. H. (2004), “Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of Vikor and Topsis”, *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 156, no. 2, pp. 445–455.
- [86] Tong, L. I., Chen, C. C. and Wang, C. H. (2007), “Optimization of multi-response processes using the Vikor method”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 31, no. 11–12, pp. 1049–1057.
- [87] Kackar, R. N. (1985), “Off-Line Quality Control, Parameter Design, and the Taguchi Method”, *J. Qual. Technol.*, vol. 17, no. 4, pp. 176–188.
- [88] Yu, P. L. (1973), “A Class of Solutions for Group Decision Problems”, *Management Science*, vol. 19, no. 8, pp. 936–946.
- [89] Zadeh, L. A. (1965), “Fuzzy sets”, *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353.
- [90] Botelho, L. M. (2017), “Tecnologia para Sistemas Inteligentes Apontamentos para as aulas sobre Representação e Raciocínio com Conceitos Imprecisos: Sistemas de Regras Baseadas na Lógica Vaga”, *Departamento de Ciências e Tecnologias da Informação do ISCTE-IUL, Lisboa*, pp. 1–55.
- [91] Roghanian, E. and Mojibian, F. (2015), “Using fuzzy FMEA and fuzzy logic in project risk management”, *Manag. Stud.*, vol. 14, no. 8, pp. 373–396.
- [92] Gallab, M., Bouloiz, H., Alaoui, Y. L., and Tkiouat, M. (2019), “Risk Assessment of Maintenance activities using Fuzzy Logic”, *Procedia Computer Science*, vol. 148, Elsevier B.V., pp. 226–235.
- [93] Yu, J. H. and Lee, S. K. (2012), “A conflict-risk assessment model for urban regeneration projects using Fuzzy-FMEA”, *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 16, no. 7, pp. 1093–1103.

- [94] The MathWorks, I. (2012), *Fuzzy Logic Toolbox- Guide User Version 2.2.15*. Natick: MathWorks.
- [95] Chen, C. T. (2000), “Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment”, *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 114, no. 1, pp. 1–9.
- [96] Liu, H. C., Liu, L., Liu, N. and Mao, L. X. (2012), “Risk evaluation in failure mode and effects analysis with extended VIKOR method under fuzzy environment”, *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 17, pp. 12926–12934.
- [97] Zwick, R., Carlstein, E. and Budescu, D. V. (1987), “Measures of similarity among fuzzy concepts: A comparative analysis”, *Int. J. Approx. Reason.*, vol. 1, no. 2, pp. 221–242.
- [98] Selim, H., Yunusoglu, M. G. and Yilmaz Balaman, Ş. (2016), “A Dynamic Maintenance Planning Framework Based on Fuzzy TOPSIS and FMEA: Application in an International Food Company”, *Qual. Reliab. Eng. Int.*, vol. 32, no. 3, pp. 795–804.
- [99] Bakhoun, E. S. and Brown, D. C. (2013), “A hybrid approach using AHP-TOPSIS-entropy methods for sustainable ranking of structural materials”, *Int. J. Sustain. Eng.*, vol. 6, no. 3, pp. 212–224.
- [100] Jain, V., Sangaiah, A., Sakhuja, K., Thoduka, S. and Aggarwal, R. (2018), “Supplier selection using fuzzy AHP and TOPSIS: a case study in the Indian automotive industry”, *Neural Comput. Appl.*, vol. 29, no. 7, pp. 555–564.
- [101] Zolfani, S. H. and Antucheviciene, J. (2012), “Team Member Selecting Based on AHP and TOPSIS Grey”, *Eng. Econ.*, vol. 23, no. 4, pp. 425–434.
- [102] Blackwell, A., Bowes, L., Harvey, L., Hesketh, A. J., Lancaster, P. and Knight, U. T. (2001), “Transforming Work Experience in Higher Educational”, *Br. Educ. Res. J.*, vol. 27, no. 3, pp. 1–17.
- [103] Ngai, E. W. T. and Chan, E. W. C. (2005), “Evaluation of knowledge management tools using AHP”, *Expert Syst. Appl.*, vol. 29, no. 4, pp. 889–899.
- [104] Pedrosa, B. (2014), “Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA) aplicada a um Secador Industrial”, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [105] Running, E. “Steam tube dryer- TSK”, 2019. [Online]. Available: <https://www.tsk-g.co.jp/en/tech/industry/std.html>. [Accessed: 01-Dec-2019].
- [106] Hall, C. W. (2006), *Handbook of Industrial Drying*, 3rd Edition, Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [107] Hamawand, I., Yusaf, T. and Bennet, J. (2014), “Study and modelling drying of banana slices under superheated steam”, *Asia Pacific Journal of Chemical Engineering Bentley*, pp. 1–13.

Anexos

Anexo I
Guia de boas práticas à elaboração de *FMEA*

Para que seja elaborada uma *FMEA* de uma forma eficaz, são descritos 21 itens a fim de preencher na *FMEA*. Como tal, observe-se o esquema abaixo apresentado.

Análise de modo e efeito de falhas																
FMEA Nº: 1		Sistema: 2		Responsável: 3		Preparado por: 4		Data FMEA: 6								
Equipa: 7		Data: 5						Resultado								
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21			
Número de Série do Item	Função	Potencial modo de falha	Potencial efeito de falha	Potencial causa de falha	Controlo dos mecanismos de falha	Severidade	Ocorrência	Detectabilidade	RPN	Ações recomendadas	Responsável das ações propostas	Ações tomadas	Severidade	Ocorrência	Detectabilidade	N-RPN

- (1) **Número da FMEA:** permitir a sua identificação.
- (2) **Sistema:** reconhecer hierarquicamente a sua posição na cadeia cinemática e identificar o sistema a analisar.
- (3) **Responsável:** preencher com o nome do responsável, departamento e grupo. Se necessário incluir o nome do fabricante de algum componente específico.
- (4) **Preparado por:** preencher com o nome do colaborador, telefone/endereço de correio eletrónico responsável pelo preenchimento da *FMEA*.
- (5) **Data:** datar a previsão da conclusão da *FMEA*.
- (6) **Data FMEA:** identificar a data que foi compilada e a última data de revisão;
- (7) **Equipa:** identificar os colaboradores, departamentos envolvidos na execução da *FMEA*.
- (8) **Número de série do item:** preencher com o nome e número do item em análise. É vantajoso, quando possível usar a mesma denominação do fabricante/identificação de projeto.
- (9) **Função:** elaborar de uma forma sucinta a função a que se destina o item. Em caso de um item realizar várias funções, a adequação de uma sub-lista poderá ser um bom princípio.
- (10) **Potencial modo de falha:** modo de falha é definido como se processa a falha. Poderá ser a causa de uma falha potencial de um nível superior do subsistema, ou ser o efeito de falha de um nível inferior. Caso seja mais do que um, enumerar em forma de sublista poderá ser uma boa solução a adotar.
- (11) **Potencial efeito de falha:** traduz-se na consequência do potencial modo de falha. É importante lembrar que existe uma hierarquia de sistema, composto

por diversos subsistemas, e estes subsistemas são constituídos por itens. Por exemplo, se um dado item sofrer rutura poderá originar um aumento de vibração no sistema, levando a que exista um funcionamento cíclico variável.

(12) **Potencial causa de falha:** é definido como sendo o que poderá ter originado a potencial falha. Pode incluir os seguintes tópicos:

- Especificação incorreta de material;
- Tempo de vida do projeto incorreto;
- Sobrecarga/ uso indevido;
- Ventilação deficiente;
- Défice na lubrificação;
- Ações de manutenção deficientes ou inadequadas;
- Sequência de aperto dos parafusos incorreta;
- Proteção ao meio ambiente incorreta.

O mecanismo que leva à causa pode incluir os seguintes tópicos:

- Fadiga;
- Desgaste;
- Corrosão;
- Fluência;
- Instabilidade estrutural.

(13) **Controlo dos mecanismos de falha:** enumerar as atividades de inspeção e verificação que controlem o funcionamento do sistema/subsistema/item.

(14) **Severidade:** consiste numa avaliação do efeito do modo de falha potencial ao próximo, seja desde subsistema ao cliente final. A Severidade só se aplica ao efeito. A redução do índice de Severidade só pode ser conseguida à custa de melhoria/revisão do projeto.

(15) **Ocorrência:** traduz a probabilidade de um mecanismo/causa específico vir a ocorrer. Na determinação da ocorrência devem ser consideradas as seguintes questões:

- Qual a experiência/ histórico acumulado em sistemas semelhantes?
- A aplicação do componente foi alterada?
- Quais as modificações no meio ambiente?
- Foi feita um estudo para estimar a taxa de ocorrência esperada ao sistema?

- (16) **Detetabilidade:** traduz a capacidade dos métodos de controlo em identificar um potencial modo de falha. A título expositivo, a carta de controlo de especificação dos produtos permite inferir se o processo está em conformidade logo é dedutível que os equipamentos estejam a operar para o fim requerido.
- (17) **Número Prioritário de Risco (RPN):** resulta no produto da classificação atribuída da severidade pela classificação atribuída da ocorrência e pela classificação atribuída da detetabilidade. Permite quantificar a criticidade do potencial modo de falha.
- (18) **Ações recomendadas:** quando os modos de falhas forem priorizados quanto à sua criticidade, são propostas ações mitigadoras, visando reduzir o nível de risco ou até mesmo a sua eliminação. Para a diminuição de risco, devem ser consideradas algumas revisões:
- Revisão de projeto;
 - Revisão do plano de manutenção;
 - Revisão das metas de produção;
 - Revisão das especificações de material.
- (19) **Responsável das ações propostas:** registar os nomes dos responsáveis pelas ações recomendadas com o respetivo prazo de execução.
- (20) **Ações tomadas:** ações que fisicamente foram possíveis de executar com base no estado do equipamento, tempo de paragem do equipamento entre outras condicionantes.
- (21) Após terem sido implementadas as ações de melhoria no sistema, deverá ser analisado o sistema com o intuito de reavaliar os níveis de Severidade, Ocorrência e Detetabilidade. Após tal reclassificação, é calculado o novo nível de risco com o intuito de verificar se a criticidade baixou efetivamente.

Anexo II

Propriedades do método de vértice geométrico [COA]

Propriedade 1: Se \tilde{m} e \tilde{n} são números reais, então $d(\tilde{m}, \tilde{n})$ é igual ao cálculo pela distância euclidiana.

Demonstração: $\tilde{m} = (m1; m2; m3)$ e $\tilde{n} = (n1; n2; n3)$ são dois números reais, logo $m1=m2=m3=\mathbf{m}$ e $n1=n2=n3=\mathbf{n}$.

Realizando o cálculo da distância é satisfeita a propriedade acima descrita:

$$\begin{aligned} d(\tilde{m}, \tilde{n}) &= \sqrt{\frac{1}{3} \cdot [(m1 - n1)^2 + (m2 - n2)^2 + (m3 - n3)^2]} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{3} \cdot [(m - n)^2 + (m - n)^2 + (m - n)^2]} = \sqrt{(m - n)^2} = |m - n| \end{aligned}$$

Propriedade 2: Se dois números *Fuzzy* \tilde{m} e \tilde{n} são idênticos então $d(\tilde{m}, \tilde{n})$ é nula.

Demonstração: Sejam $\tilde{m} = (m1; m2; m3)$ e $\tilde{n} = (n1; n2; n3)$ dois números *Fuzzy*-triangulares.

(2.1) Se \tilde{m} e \tilde{n} forem idênticos então $m1=n1$, $m2=n2$ e $m3=n3$. Calculando a distância satisfaz-se a propriedade acima descrita:

$$\begin{aligned} d(\tilde{m}, \tilde{n}) &= \sqrt{\frac{1}{3} \cdot [(m1 - n1)^2 + (m2 - n2)^2 + (m3 - n3)^2]} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{3} \cdot [(0)^2 + (0)^2 + (0)^2]} = 0 \end{aligned}$$

(2.2) Se $d(\tilde{m}, \tilde{n})=0$, então $d(\tilde{m}, \tilde{n})$:

$$d(\tilde{m}, \tilde{n}) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot [(m1 - n1)^2 + (m2 - n2)^2 + (m3 - n3)^2]} = 0$$

Implica obrigatoriamente que $m1=n1$, $m2=n2$, $m3=n3$.

Propriedade 3: Sejam \tilde{A} , \tilde{B} e \tilde{C} três números *Fuzzy*-triangulares. Então \tilde{B} encontra-se mais próximo de \tilde{A} , do que de \tilde{C} se e só se $d(\tilde{A}, \tilde{B}) < d(\tilde{A}, \tilde{C})$.

Demonstração: Apesar desta propriedade ser trivial, observa-se o seguinte exemplo. Considerando:

$$\tilde{A} = (1,3,5)$$

$$\tilde{B} = (2,4,7)$$

$$\tilde{C} = (5,7,9)$$

$$d(\tilde{A}, \tilde{B}) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot [(1-2)^2 + (3-4)^2 + (5-7)^2]} = \sqrt{2}$$

$$d(\tilde{A}, \tilde{C}) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot [(1-5)^2 + (3-7)^2 + (5-9)^2]} = 4$$

É satisfeita a propriedade 3, dado que \tilde{B} é mais próximo de \tilde{A} que \tilde{C} face a \tilde{A} .

Propriedade 4: Seja um número difuso na origem, $\tilde{O} = (0,0,0)$.

Se $d(\tilde{A}, \tilde{O}) < d(\tilde{B}, \tilde{O})$, então o número \tilde{A} está mais próximo da origem que o número \tilde{B} . Esta propriedade apresenta um raciocínio semelhante à propriedade 3, e como tal não é necessário demonstrar a veracidade da mesma.

Anexo III

Explicação do algoritmo complementar da metodologia *AHP*

A fim de explicar os passos do algoritmo criado, realizar-se-á uma análise de cada subconjunto de instruções presente no algoritmo da metodologia complementar *AHP*.

1.1- Inputs de comparações entre critérios (linha 3 – linha 35)

Linhas de código	Operação a executar
5	Função de instrução ao utilizador para introduzir o número de critérios de análise.
7-9	Função que garante que o número de critérios é obrigatoriamente um número não negativo e maior que zero, a fim de dar continuidade ao estudo.
13	Criação de uma matriz [n] a fim de armazenar as classificações entre critérios.
14-24	Realização das avaliações entre critérios, somente na diagonal superior. São empregues dois ciclos <i>for</i> a fim de percorrer as diversas posições (linha e coluna) dos elementos contidos na matriz [n] e com a função de condição <i>if</i> garante que sejam avaliados somente os critérios nas posições da diagonal superior. Os restantes são logicamente dedutíveis.
26-32	Preenchimento da diagonal inferior dado ser logicamente dedutível. Realizam-se dois ciclos <i>for</i> a fim de calcular em cada posição da diagonal inferior o valor inverso atribuído ao da diagonal superior.
34-35	Exposição da matriz de comparações par-a-par preenchida na totalidade.

1.2- Cálculo da matriz de critérios normalizada (linha 36 – linha 49)

Linhas de código	Operação a executar
37	Função que realiza o somatório de cada coluna da matriz [n] .
38-39	Exposição do somatório calculado anteriormente.
40	Criação de uma matriz [n1] a fim de armazenar as classificações entre critérios normalizada.
42-46	Realização dos cálculos inerentes à normalização da matriz [n] . A adequação de dois ciclos <i>for</i> possibilitam que seja efetuado o processo de normalização em todos os elementos da matriz pelo respetivo valor inerente a cada coluna.
48-49	Exposição da matriz calculada [n1] .

1.3- Determinação do vetor de prioridades e exposição de resultados respeitantes à comparação entre critérios (linha 50 – linha 57)

Linhas de código	Operação a executar
51	Criação de um vetor de prioridades [v_prior] .
52	Cálculo do vetor de prioridades [v_prior] .
54-57	Exposição do peso determinado pelo vetor de prioridade de cada critério analisado.

1.4- Análise da consistência lógica das comparações realizadas entre critérios (linha 58 – linha 213)

Linhas de código	Operação a executar
59-60	Criação de uma variável auxiliar nula de forma a realizar o somatório do processo de cálculo consequente.
61-64	Processo de cálculo auxiliar de λ_{max} .
66	Cálculo do valor de λ_{max} .
69	Cálculo do índice de consistência segundo a metodologia <i>AHP</i> de Saaty.
73-105	Função de condição <i>if</i> a fim de selecionar o índice aleatório [IR] consoante o número de critérios a avaliar e cálculo da razão de consistência.
107-112	Verificação da consistência lógica calculada e exposição do resultado consequente.
115-207	Adequação da função <i>loop while</i> a fim de que seja garantida a condição de consistência lógica das decisões tomadas.
210-212	Exposição dos resultados de consistência resultantes das comparações entre critérios.

1.5- Selecionar a alternativa adequada para cada critério (linha 214 – linha 220)

Linhas de código	Operação a executar
215	Função de instrução ao utilizador que introduza o número de alternativas a avaliar.
217-219	Função que garante que o número de alternativas seja obrigatoriamente um número não negativo e maior que zero.

1.5.1- Comparações entre alternativas de critérios (linha 221 – linha 442)

Linhas de código	Operação a executar
223-434	Função de ciclo <i>for</i> que permite que todas as instruções ao cálculo pela metodologia <i>AHP</i> , sejam realizadas a fim de determinar os pesos de cada alternativa na análise individual de cada critério, respetivo. Os processos de cálculo são análogos aos passos explícitos em 1.1 até 1.4, respetivamente.
438-442	Exposição dos resultados obtidos nas análises de verificações de consistência, sendo exposto em formato de tabela os resultados de maior relevo (λ_{max} , Índice de consistência, Índice aleatório, Razão de consistência).

1.6- Peso relativo das alternativas em relação ao objetivo geral (linha 443- linha 450)

Linhas de código	Operação a executar
445	Cálculo do peso de cada alternativa face ao objetivo geral.
447-449	Exposição dos resultados dos pesos de cada alternativa anteriormente calculados.

1.7- Guardar pesos das alternativas dos critérios em estudo (linha 451- linha 461)¹²

Linhas de código	Operação a executar
453	Exposição de um caixa de diálogo a fim de perguntar ao utilizador se pretende guardar os dados obtidos na sua análise.
455-458	Caso a resposta do utilizador seja “ <i>YES</i> ”, a função de comparação de <i>string</i> 's assume a condição de verdadeira e segue a instrução ao utilizador de indicar o nome do ficheiro a guardar e executa o processo. Caso contrário a instrução de guardar é negada e termina o processo de guardar o ficheiro.
460-461	Exposição de uma caixa de texto a informar que o estudo terminou.

¹²**Nota:** As linhas não-numeradas nas “Linhas de código” das tabelas acima expostas, devem-se à particularidade de constituírem linhas em vazio ou preenchidas com títulos a fim de estruturar o algoritmo do presente Anexo.

Anexo IV

Algoritmo complementar da metodologia *AHP*

[código de *Matlab*]

```

1  %1.Atribuição dos pesos aos critérios da avaliação da criticidade pela metodologia AHP
2  clear all; clc;
3  %% 1.1 - Inputs de comparações entre critérios
4  %Nº de critérios:
5  ndim=input('Introduza o nº total de critérios: ');
6
7  while ndim<0
8  ndim=input('Introduza o nº total de critérios: ');
9  end
10
11 %Preenchimento da matriz de comparação par-a-par [diagonal superior]-critérios
12
13 n=[];
14 for i=1:ndim
15     for j=1:ndim
16
17         if i==j
18             n(i,j)=1;
19         elseif j>i
20             r00=['Introduza a importância do critério ' num2str(i) ' face ao critério ' num2str(j) ':'];
21             n(i,j)=input(r00);
22         end
23     end
24 end
25
26 %Preenchimento da matriz de comparação par-a-par [diagonal inferior]-> Lógica
27 %inversa da diagonal superior-critérios
28 for i=1:ndim
29     for j=1:ndim
30         n(j,i)=n(i,j)^-1;
31     end
32 end
33
34 disp('Matriz de comparação par-a-par-critérios:')
35 disp(n);
36 %% 1.2- Cálculo da matriz de critérios normalizada
37 csum=sum(n);
38 disp('Somatório de cada coluna da matriz de comparação par-a-par:')
39 disp(csum);
40 n1=[];
41
42 for i=1:ndim
43     for j=1:ndim
44         n1(i,j)=n(i,j)/csum(1,j);
45     end
46 end
47
48 disp('Matriz de comparação par-a-par normalizada-critérios:')
49 disp(n1);
50 %% 1.3- Determinação do vetor de prioridade e exposição de resultados-critérios
51 v_prior=[];
52 v_prior=sum(n1,2)/ndim;
53
54 for i=1:ndim
55     r13=['O peso do critério ' num2str(i) ' é: ', num2str(v_prior(i)) '.'];
56     disp(r13);
57 end
58 %% 1.4- Análise da consistência [critérios]
59 lambdamax_aux=0;
60

```

```

61 n_aux=n*v_prior;
62 for i=1:ndim
63     lambdamax_aux=lambdamax_aux+n_aux(i,1)/v_prior(i,1);
64 end
65
66 lambdamax=1/ndim*lambdamax_aux;
67
68 %Índice de consistência
69 ic=(lambdamax-ndim)/(ndim-1);
70
71 %Razão de consistência
72 %%ir==Índice aleatório
73 ir=[0 0 0.58 0.9 1.12 1.24 1.32 1.41 1.45 1.49 1.51 1.48 1.56 1.57];
74
75 if ndim==1
76     rc=ic/ir(1);
77 elseif ndim==2
78     rc=ic/ir(2);
79 elseif ndim==3
80     rc=ic/ir(3);
81 elseif ndim==4
82     rc=ic/ir(4);
83 elseif ndim==5
84     rc=ic/ir(5);
85 elseif ndim==6
86     rc=ic/ir(6);
87 elseif ndim==7
88     rc=ic/ir(7);
89 elseif ndim==8
90     rc=ic/ir(8);
91 elseif ndim==9
92     rc=ic/ir(9);
93 elseif ndim==10
94     rc=ic/ir(10);
95 elseif ndim==11
96     rc=ic/ir(11);
97 elseif ndim==12
98     rc=ic/ir(12);
99 elseif ndim==13
100    rc=ic/ir(13);
101 elseif ndim==14
102    rc=ic/ir(14);
103 elseif ndim==(15)
104    rc=ic/ir(15);
105 end
106
107 if rc<0.1
108     r={'As comparações par-a-par são consistentes.'};
109 else
110     r={'As comparações par-a-par são inconsistentes. Refaça a matriz de comparação par-a-par.'};
111 end
112 disp(r);
113
114 %%Para garantir que o estudo dos critérios é consistente.
115 while strcmp(r,'As comparações par-a-par são inconsistentes. Refaça a matriz de comparação par-a-par.')
116     for i=1:ndim
117         for j=1:ndim
118             if i==j
119                 n(i,j)=1;

```

```

120     elseif j>i
121         r00=['Introduza a importância do critério ' num2str(i) ' face ao critério ' num2str(j) ':'];
122         n(i,j)=input(r00);
123     end
124 end
125 end
126
127 for i=1:ndim
128     for j=1:ndim
129         n(j,i)=n(i,j)^-1;
130     end
131 end
132
133 disp('Matriz de comparação par-a-par-critérios:')
134 disp(n);
135
136 csum=sum(n);
137 n1=[];
138
139 for i=1:ndim
140     for j=1:ndim
141         n1(i,j)=n(i,j)/csum(1,j);
142     end
143 end
144
145 disp('Matriz de comparação par-a-par normalizada-critérios:')
146 disp(n1);
147
148 v_prior=[];
149 v_prior=sum(n1,2)/ndim;
150
151 for i=1:ndim
152     r13=['O peso do critério ' num2str(i) ' é: ', num2str(v_prior(i)) '.'];
153     disp(r13);
154 end
155
156 lambdamax_aux=0;
157 n_aux=n*v_prior;
158
159 for i=1:ndim
160     lambdamax_aux=lambdamax_aux+n_aux(i,1)/v_prior(i,1);
161 end
162 lambdamax=1/ndim*lambdamax_aux;
163
164 r14=['Lambda máximo é: ', num2str(lambdamax)];
165 disp(r14);
166
167 ic=(lambdamax-ndim)/(ndim-1);
168
169 if ndim==1
170     rc=ic/ir(1);
171 elseif ndim==2
172     rc=ic/ir(2);
173 elseif ndim==3
174     rc=ic/ir(3);
175 elseif ndim==4
176     rc=ic/ir(4);
177 elseif ndim==5
178     rc=ic/ir(5);
179 elseif ndim==6

```

```

180 rc=ic/ir(6);
181 elseif ndim==7
182 rc=ic/ir(7);
183 elseif ndim==8
184 rc=ic/ir(8);
185 elseif ndim==9
186 rc=ic/ir(9);
187 elseif ndim==10
188 rc=ic/ir(10);
189 elseif ndim==11
190 rc=ic/ir(11);
191 elseif ndim==12
192 rc=ic/ir(12);
193 elseif ndim==13
194 rc=ic/ir(13);
195 elseif ndim==14
196 rc=ic/ir(14);
197 elseif ndim==(15)
198 rc=ic/ir(15);
199 end
200
201 if rc<0.1
202 r={'As comparações par-a-par são consistentes.'};
203 else
204 r={'As comparações par-a-par são inconsistentes. Refaça a matriz de comparação par-a-par.'};
205 end
206 disp(r);
207 end
208
209 %Exposição de resultados de consistência
210 Atributo=[lambdamax;ic;rc;r];
211 rftable=table(Atributo,'RowNames',{'Lambda max.','I.C','R.C','Consistência'});
212 disp(rftable);
213
214 %% 1.5- Selecionar a alternativa adequada para cada critério
215 ndim1=input('Indique o número de alternativas: ');
216
217 while ndim1<0
218 ndim1=input('Indique o número de alternativas: ');
219 end
220
221 %% 1.5.1 - Processo de comparação e consistência lógica análogo ao processo entre critérios
222 %Nº de alternativas:
223 v_prior1=[];
224 for p=1:ndim
225 n6=[];
226
227 %Preenchimento da matriz de comparação par-a-par [diagonal superior]-critérios
228 for i=1:ndim1
229 for j=1:ndim1
230
231 if i==j
232 n6(i,j)=1;
233 elseif j>i
234 r61=['Introduza a importância do alternativa ' num2str(i) ' face ao alternativa ' num2str(j) ' do
critério ' num2str(p) ' : '];
235 n6(i,j)=input(r61);
236 end
237 end
238 end

```

```

239
240 %Preenchimento da matriz de comparação par-a-par [diagonal inferior]-> Lógica
241 %inversa da diagonal superior-critérios
242 for i=1:ndim1
243     for j=1:ndim1
244         n6(j,i)=n6(i,j)^-1;
245     end
246 end
247 r16112=['Matriz de comparação par-a-par-alternativas do critério ' num2str(p)];
248 disp(r16112);
249 disp(n6);
250
251 %Cálculo da matriz de critérios normalizada
252 csum1=sum(n6);
253 r1621=['Somatório de cada coluna da matriz de comparação par-a-par-alternativas do critério '
num2str(p)];
254 disp(r1621);
255 disp(csum1);
256
257 n61=[];
258 for i=1:ndim1
259     for j=1:ndim1
260         n61(i,j)=n6(i,j)/csum1(1,j);
261     end
262 end
263 r1622=['Matriz de comparação par-a-par normalizada-alternativas do critério ' num2str(p)];
264 disp(r1622);
265 disp(n61);
266
267 %Determinação do vetor de prioridade e exposição de resultados-critérios
268
269 v_prior1(:,p)=sum(n61,2)/ndim1;
270
271 r163=['O vetor de prioridades das alternativas do critério ' num2str(p) ' é: '];
272 disp(r163);
273 disp(v_prior1(:,p));
274
275 %Análise da consistência [critérios]
276 lambdamax_aux1=0;
277 n_aux1=n6*v_prior1(:,p);
278
279 for i=1:ndim1
280     lambdamax_aux1=lambdamax_aux1+n_aux1(i,1)/v_prior1(i,p);
281 end
282
283 lambdamax1=1/ndim1*lambdamax_aux1;
284
285 %Índice de consistência
286 ic1=(lambdamax1-ndim1)/(ndim1-1);
287
288 %Razão de consistência
289
290 if ndim1==1
291     rc1=ic1/ir(1);
292 elseif ndim1==2
293     rc1=ic1/ir(2);
294 elseif ndim1==3
295     rc1=ic1/ir(3);
296 elseif ndim1==4
297     rc1=ic1/ir(4);

```

```

298 elseif ndim1==5
299     rc1=ic1/ir(5);
300 elseif ndim1==6
301     rc1=ic1/ir(6);
302 elseif ndim1==7
303     rc1=ic1/ir(7);
304 elseif ndim1==8
305     rc1=ic1/ir(8);
306 elseif ndim1==9
307     rc1=ic1/ir(9);
308 elseif ndim1==10
309     rc1=ic1/ir(10);
310 elseif ndim1==11
311     rc1=ic1/ir(11);
312 elseif ndim1==12
313     rc1=ic1/ir(12);
314 elseif ndim1==13
315     rc1=ic1/ir(13);
316 elseif ndim1==14
317     rc1=ic1/ir(14);
318 elseif ndim1==(15)
319     rc1=ic1/ir(15);
320 end
321
322 if rc1<0.1
323 r1={'As comparações par-a-par são consistentes.'};
324 else
325 r1={'As comparações par-a-par são inconsistentes. Refaça a matriz de comparação par-a-par.'};
326 end
327 disp(r1);
328
329 %%Para garantir que o estudo dos critérios é consistente.
330 while strcmp(r1,'As comparações par-a-par são inconsistentes. Refaça a matriz de comparação par-a-par.')
331
332 %Preenchimento da matriz de comparação par-a-par [diagonal superior]-critérios
333 for i=1:ndim1
334     for j=1:ndim1
335
336         if i==j
337             n6(i,j)=1;
338         elseif j>i
339             r61=['Introduza a importância do alternativa ' num2str(i) ' face ao alternativa ' num2str(j) ' do
critério' num2str(p) ' : '];
340             n6(i,j)=input(r61);
341         end
342     end
343 end
344
345 %Preenchimento da matriz de comparação par-a-par [diagonal inferior]-> Lógica
346 %inversa da diagonal superior-critérios
347 for i=1:ndim1
348     for j=1:ndim1
349         n6(j,i)=n6(i,j)^-1;
350     end
351 end
352 r16112=['Matriz de comparação par-a-par-alternativas do critério ' num2str(p)];
353 disp(r16112);
354 disp(n6);
355

```

```

356 %Cálculo da matriz de critérios normalizada
357 csum1=sum(n6);
358 r1621=['Somatório de cada coluna da matriz de comparação par-a-par-alternativas do critério '
num2str(p)];
359 disp(r1621);
360 disp(csum1);
361
362 n61=[];
363 for i=1:ndim1
364     for j=1:ndim1
365         n61(i,j)=n6(i,j)/csum1(1,j);
366     end
367 end
368 r1622=['Matriz de comparação par-a-par normalizada-alternativas do critério ' num2str(p)];
369 disp(r1622);
370 disp(n1);
371
372 %Determinação do vetor de prioridade e exposição de resultados-critérios
373 v_prior1(:,p)=sum(n61,2)/ndim1;
374
375 r163=['O vetor de prioridades das alternativas do critério ' num2str(p) ' é: '];
376 disp(r163);
377 disp(v_prior1(:,p))
378
379
380 %Análise da consistência [critérios]
381 lambdamax_aux1=0;
382 n_aux1=n6*v_prior1(:,p);
383
384 for i=1:ndim1
385
386     lambdamax_aux1=lambdamax_aux1+n_aux1(i,1)/v_prior1(i,p);
387 end
388
389 lambdamax1=1/ndim1*lambdamax_aux1;
390
391 %Índice de consistência
392
393 ic1=(lambdamax1-ndim1)/(ndim1-1);
394
395 if ndim1==1
396     rc1=ic1/ir(1);
397 elseif ndim1==2
398     rc1=ic1/ir(2);
399 elseif ndim1==3
400     rc1=ic1/ir(3);
401 elseif ndim1==4
402     rc1=ic1/ir(4);
403 elseif ndim1==5
404     rc1=ic1/ir(5);
405 elseif ndim1==6
406     rc1=ic1/ir(6);
407 elseif ndim1==7
408     rc1=ic1/ir(7);
409 elseif ndim1==8
410     rc1=ic1/ir(8);
411 elseif ndim1==9
412     rc1=ic1/ir(9);
413 elseif ndim1==10
414     rc1=ic1/ir(10);

```

```

415 elseif ndim1==11
416     rc1=ic1/ir(11);
417 elseif ndim1==12
418     rc1=ic1/ir(12);
419 elseif ndim1==13
420     rc1=ic1/ir(13);
421 elseif ndim1==14
422     rc1=ic1/ir(14);
423 elseif ndim1==(15)
424     rc1=ic1/ir(15);
425 end
426
427 if rc1<0.1
428     r1={'As comparações par-a-par são consistentes.'};
429 else
430     r1={'As comparações par-a-par são inconsistentes. Refaça a matriz de comparação par-a-par.'};
431 end
432 disp(r1);
433
434 end
435
436 %Exposição de resultados de consistência
437
438 Atributo=[lambdamax1;ic1;rc1;r1];
439 rftable=table(Atributo,'RowNames',{'Lambda max.','I.C','R.C','Consistência'});
440
441 disp(rftable);
442 end
443 %% 1.6- Peso relativo das alternativas em relação ao objectivo geral
444
445 p_rel=v_prior1*v_prior;
446
447 r71=['O vetor com os pesos finais de cada alternativa é:'];
448 disp(r71);
449 disp(p_rel);
450
451 %% 1.7- Guardar pesos das alternativas do critério em estudo
452
453 sq3=questdlg('Deseja guardar resultados do estudo?','Opção de guardar');
454
455 if strcmp(sq3,'Yes')
456     sq4=input('Indique o nome do ficheiro a guardar: ');
457     save(sq4);
458 end
459
460 r81=['Fim de estudo'];
461 disp(r81)

```

Anexo V

Explicação do algoritmo complementar da metodologia híbrida *AHP-TOPSIS*

A fim de explicar os passos do algoritmo criado, realizar-se-á uma explicação de cada subconjunto de instruções presente no algoritmo da metodologia complementar *AHP*.

2.1- Critérios de avaliação júri-*AHP* (linha 3 – linha 31)

Linhas de código	Operação a executar
3	Funções que permitem eliminar as variáveis armazenadas em memória bem como de eliminar os caracteres alfanuméricos presentes no <i>Command Window</i> do <i>Matlab</i> .
4	Criação de uma matriz [n] a fim de armazenar as classificações entre critérios.
5	Função de instrução ao utilizador para introduzir o número de critérios a analisar.
8-19	Realização das avaliações entre critérios, somente na diagonal superior. São empregues dois ciclos <i>for</i> a fim de percorrer as diversas posições (linhas/colunas) dos elementos contidos na matriz [n] . A função de condição <i>if</i> garante que sejam avaliados somente os critérios nas posições da diagonal superior. Os restantes elementos são logicamente dedutíveis.
23-27	Preenchimento da diagonal inferior dado ser logicamente dedutível. Realizam-se dois ciclos <i>for</i> para calcular em cada posição elementar o valor inverso atribuído ao da diagonal superior.
29-30	Exposição da matriz de comparações par-a-par preenchida na sua totalidade.

2.2- Cálculo da matriz de critérios normalizada - *AHP* (linha 32 – linha 46)

Linhas de código	Operação a executar
33	Somatório por coluna da matriz [n] .
34-35	Exposição do somatório calculado anteriormente.
36	Criação de uma matriz [n1] a fim de armazenar as classificações entre critérios normalizados.
38-42	Realização dos cálculos inerentes à normalização da matriz [n] . A adequação de dois ciclos <i>for</i> possibilitam que seja efetuado o processo de normalização em todos os elementos da matriz.
44-45	Exposição da matriz de comparações normalizada [n1] .

2.3- Determinação do vetor de prioridades e exposição de resultados respeitantes à comparação entre critérios-*AHP* (linha 47 – linha 54)

Linhas de código	Operação a executar
48	Criação de um vetor de prioridades [v_prior] .
49	Cálculo do vetor de prioridades [v_prior] .
51-54	Exposição do peso determinado pelo vetor de prioridades de cada critério, respetivamente.

2.4- Análise da consistência lógica das comparações realizadas entre critérios – AHP (linha 55 – linha 204)

Linhas de código	Operação a executar
56	Criação de uma variável auxiliar nula de forma a realizar o somatório do processo de cálculo seguinte.
57	Processo de cálculo inerente à variável auxiliar de λ_{max} .
59-61	Processo de cálculo auxiliar à determinação de λ_{max} .
63	Processo de cálculo do valor de λ_{max} .
66	Cálculo do índice de consistência segundo a metodologia AHP de Saaty.
70-109	Função de condição <i>if</i> a fim de selecionar o índice aleatório [IR] consoante o número de critérios a avaliar e cálculo da razão de consistência [RC]. No final do processo é exposto a condição da comparação realizada.
112-196	Adequação da função <i>loop while</i> para garantir a condição de consistência lógica das decisões tomadas.
198-204	Exposição dos resultados de consistência resultantes das comparações entre critérios de avaliação dos elementos do júri.

2.5- Exposição de resultados de consistência das comparações entre critérios de avaliação dos elementos do júri-AHP (linha 205 – linha 211)

Linhas de código	Operação a executar
207-208	Ordenação dos resultados obtidos nas análises de consistência lógica, sendo exposto em forma de tabela os resultados de maior relevo (λ_{max} , Índice de consistência, Índice aleatório, Razão de consistência)
210	Exposição dos resultados anteriores.

2.6- Peso de cada elemento do júri – TOPSIS (linha 212- linha 305)

2.6.1 Avaliações de cada elemento do júri (linha 217-linha 231)

Linhas de código	Operação a executar
218	Criação de uma matriz [d] a fim de constituir a matriz de decisão.
219	Função de instrução ao utilizador a fim de que seja introduzido o número de elementos que compõem o júri.
221-226	Realização do preenchimento da matriz de decisão-TOPSIS [d]. A adequação de dois ciclos <i>for</i> possibilitam que seja efetuado o processo de avaliação dos diversos elementos do júri em cada critério respetivo.
228-230	Exposição da matriz de decisão- TOPSIS [d].

2.6.2 Normalização da matriz de decisão [d] dos elementos do júri – TOPSIS (linha 232-linha 239)

Linhas de código	Operação a executar
233	Criação de uma matriz [r] a fim de constituir a matriz de decisão normalizada.
234	Processo da normalização da matriz de decisão [r], utilizando a função <i>norm</i> que permite obter diretamente a norma euclidiana da matriz em causa.
236-238	Exposição da matriz de decisão normalizada de <i>TOPSIS</i> [r].

2.6.3 Ponderação dos critérios na matriz de decisão normalizada [r] dos elementos do júri– TOPSIS (linha 240-linha 252)

Linhas de código	Operação a executar
241	Criação de uma matriz [v] a fim de constituir a matriz de decisão normalizada ponderada.
243-247	Processo de ponderação da matriz de decisão normalizada [r]. A utilização de dois ciclos <i>for</i> permitem que seja realizada a ponderação de cada critério a cada avaliação do elemento do júri, respetivamente.
249-251	Exposição da matriz de decisão normalizada ponderada de <i>TOPSIS</i> [v].

2.6.4 Determinação dos vetores das distâncias ideais-positivas e distâncias ideais-negativas - TOPSIS (linha 253-linha 288)

Linhas de código	Operação a executar
256-261	Criação de variáveis importantes ao cálculo dos vetores das distâncias ideais [dpos], [ap], [dp], [dneg], [an], [dn].
265-270	Determinação dos máximos e mínimos em cada coluna da matriz [v].
272-279	Processo de cálculo a fim de determinar as distâncias ideais-positivas e as distâncias ideais negativas. Cada tipologia de distância é armazenada em [dp] e [dn] respetivamente para cada elemento do júri.
281-283	Exposição dos resultados do vetor da distância ideal-positiva [dp].
285-287	Exposição dos resultados do vetor da distância ideal-negativa [dn].

2.6.5 Determinação do coeficiente de aproximação para cada elemento do júri – TOPSIS (linha 289-linha 297)

Linhas de código	Operação a executar
290	Criação da variável de armazenamento dos valores obtidos para o coeficiente de aproximação pela metodologia <i>TOPSIS</i> [cc_juri]
292-296	Determinação do coeficiente de aproximação a cada elemento do júri.

2.6.6 Determinar o peso de cada elemento do júri (linha 298-linha 304)

Linhas de código	Operação a executar
299	Criação de um vetor de aglomeração dos pesos de cada elemento de júri [p_juri].
301-303	Cálculo do peso de cada elemento de júri, tendo como base o resultado do coeficiente de aproximação determinado anteriormente.

2.6.7 Exposição de resultados do coeficiente de aproximação associado a cada elemento de júri – TOPSIS (linha 305-linha 310)

Linhas de código	Operação a executar
307-310	Exposição dos resultados do coeficiente de aproximação associado a cada elemento de júri.

2.7- Guardar pesos de tomada de decisão dos elementos de júri (linha 311-linha 321)¹³

Linhas de código	Operação a executar
305	Exposição de um caixa de diálogo a fim de perguntar ao utilizador se pretende guardar os dados obtidos na sua análise.
307-310	Caso a resposta do utilizador seja “YES”, a função de comparação de <i>string</i> 's assume “condição de verdade” e segue a instrução ao utilizador de indicar o nome do ficheiro a guardar e executa o processo. Caso contrário a instrução de guardar é negada e termina o processo de guardar o ficheiro.
312-314	Exposição de uma caixa de texto a informar que o estudo pelo algoritmo terminou.

¹³ **Nota:** As linhas não-numeradas nas “Linhas de código” das tabelas acima expostas, devem-se à particularidade de constituírem linhas em vazio ou preenchidas com títulos a fim de estruturar o algoritmo do presente Anexo.

Anexo VI

Algoritmo complementar da metodologia híbrida *AHP-TOPSIS* [código de *Matlab*]

```

1  %2.Atribuição dos pesos do júri pela abordagem híbrida AHP-TOPSIS
2  %% 2.1- Critérios de avaliação júri-AHP
3  clear all;clc;
4  n=[];
5  ndim=input('Introduza o nº total de critérios: ');
6
7  %Preenchimento da matriz de comparação par-a-par [diagonal
8  %superior]-critérios AHP
9      for i=1:ndim
10         for j=1:ndim
11             if i==j
12                 n(i,j)=1;
13             elseif j>i
14                 r00=['Introduza a importância do critério ' num2str(i) ' face ao critério ' num2str(j) ':'];
15                 n(i,j)=input(r00);
16             end
17         end
18     end
19 end
20
21 %Preenchimento da matriz de comparação par-a-par [diagonal inferior]-> Lógica
22 %inversa da diagonal superior-critérios
23 for i=1:ndim
24     for j=1:ndim
25         n(j,i)=n(i,j)^-1;
26     end
27 end
28
29 disp('Matriz de comparação par-a-par-critérios:')
30 disp(n);
31
32 %% 2.2-Cálculo da matriz de critérios normalizada- AHP
33 csum=sum(n);
34 disp('Somatório de cada coluna da matriz de comparação par-a-par:')
35 disp(csum);
36 n1=[];
37
38 for i=1:ndim
39     for j=1:ndim
40         n1(i,j)=n(i,j)/csum(1,j);
41     end
42 end
43
44 disp('Matriz de comparação par-a-par normalizada-critérios:')
45 disp(n1);
46
47 %% 2.3-Determinação do vetor de prioridades e exposição de resultados respeitantes à
comparação entre critérios-AHP
48 v_prior=[];
49 v_prior=sum(n1,2)/ndim;
50
51 for i=1:ndim
52     r13=['O peso do critério ' num2str(i) ' é: ', num2str(v_prior(i)) '.'];
53     disp(r13);
54 end
55 %% 2.4- Análise da consistência lógica das comparações entre critérios- AHP
56 lambdamax_aux=0;
57 n_aux=n*v_prior;
58
59 for i=1:ndim

```

```

60     lambdamax_aux=lambdamax_aux+n_aux(i,1)/v_prior(i,1);
61 end
62
63     lambdamax=1/ndim*lambdamax_aux;
64
65     %Índice de consistência
66     ic=(lambdamax-ndim)/(ndim-1);
67
68     %Razão de consistência
69     %%ir==Índice aleatório
70     ir=[0 0 0.58 0.9 1.12 1.24 1.32 1.41 1.45 1.49 1.51 1.48 1.56 1.57];
71
72     if ndim==1
73         rc=ic/ir(1);
74     elseif ndim==2
75         rc=ic/ir(2);
76     elseif ndim==3
77         rc=ic/ir(3);
78     elseif ndim==4
79         rc=ic/ir(4);
80     elseif ndim==5
81         rc=ic/ir(5);
82     elseif ndim==6
83         rc=ic/ir(6);
84     elseif ndim==7
85         rc=ic/ir(7);
86     elseif ndim==8
87         rc=ic/ir(8);
88     elseif ndim==9
89         rc=ic/ir(9);
90     elseif ndim==10
91         rc=ic/ir(10);
92     elseif ndim==11
93         rc=ic/ir(11);
94     elseif ndim==12
95         rc=ic/ir(12);
96     elseif ndim==13
97         rc=ic/ir(13);
98     elseif ndim==14
99         rc=ic/ir(14);
100    elseif ndim==(15)
101        rc=ic/ir(15);
102    end
103
104    if rc<0.1
105        r={'As comparações par-a-par são consistentes.'};
106    else
107        r={'As comparações par-a-par são inconsistentes. Refaça a matriz de comparação par-a-par.'};
108    end
109    disp(r);
110
111    %%Para garantir que o estudo dos critérios é consistente.
112    while strcmp(r,'As comparações par-a-par são inconsistentes. Refaça a matriz de comparação par-a-par.')
113        for i=1:ndim
114            for j=1:ndim
115                if i==j
116                    n(i,j)=1;
117                elseif j>i
118                    r00=[ 'Introduza a importância do critério ' num2str(i) ' face ao critério ' num2str(j) ':' ];

```

```

119     n(i,j)=input(r00);
120     end
121     end
122 end
123
124 for i=1:ndim
125     for j=1:ndim
126         n(j,i)=n(i,j)^-1;
127     end
128 end
129
130 disp('Matriz de comparação par-a-par-critérios:')
131 disp(n);
132
133 csum=sum(n);
134 n1=[];
135
136 for i=1:ndim
137     for j=1:ndim
138         n1(i,j)=n(i,j)/csum(1,j);
139     end
140 end
141
142 disp('Matriz de comparação par-a-par normalizada-critérios:')
143 disp(n1);
144
145 v_prior=[];
146 v_prior=sum(n1,2)/ndim;
147
148 for i=1:ndim
149     r13=['O peso do critério ' num2str(i) ' é: ', num2str(v_prior(i)) '.'];
150     disp(r13);
151 end
152
153 lambdamax_aux=0;
154 n_aux=n*v_prior;
155
156 for i=1:ndim
157     lambdamax_aux=lambdamax_aux+n_aux(i,1)/v_prior(i,1);
158 end
159 lambdamax=1/ndim*lambdamax_aux;
160
161 r14=['Lambda máximo é: ', num2str(lambdamax)];
162 disp(r14);
163
164 ic=(lambdamax-ndim)/(ndim-1);
165
166 if ndim==1
167     rc=ic/ir(1);
168 elseif ndim==2
169     rc=ic/ir(2);
170 elseif ndim==3
171     rc=ic/ir(3);
172 elseif ndim==4
173     rc=ic/ir(4);
174 elseif ndim==5
175     rc=ic/ir(5);
176 elseif ndim==6
177     rc=ic/ir(6);
178 elseif ndim==7

```

```

179 rc=ic/ir(7);
180 elseif ndim==8
181 rc=ic/ir(8);
182 elseif ndim==9
183 rc=ic/ir(9);
184 elseif ndim==10
185 rc=ic/ir(10);
186 elseif ndim==11
187 rc=ic/ir(11);
188 elseif ndim==12
189 rc=ic/ir(12);
190 elseif ndim==13
191 rc=ic/ir(13);
192 elseif ndim==14
193 rc=ic/ir(14);
194 elseif ndim==(15)
195 rc=ic/ir(15);
196 end
197
198 if rc<0.1
199 r={'As comparações par-a-par são consistentes.'};
200 else
201 r={'As comparações par-a-par são inconsistentes. Refaça a matriz de comparação par-a-par.'};
202 end
203 disp(r);
204 end
205 %% 2.5-Exposição de resultados de consistência AHP
206
207 Atributo=[lambdamax;ic;rc;r];
208 rftable=table(Atributo,'RowNames',{'Lambda max.','I.C','R.C','Consistência'});
209
210 disp(rftable);
211
212 %% 2.6-Determinar o peso de decisão de cada elemento de juri- TOPSIS
213 %% Observações: Dada a particularidade de metodologia AHP não realizar
214 %% análises para somente dois elementos de juri, esta parte da análise é
215 %% feita segundo a metodologia TOPSIS.
216
217 %2.6.1.Avaliações dos elementos de júri-[d]
218 d=[];
219 ndim1=input('Indique o número de elementos que compõe o júri :');
220
221 for i=1:ndim1
222 for j=1:ndim
223 r161=['Introduza a importância do júri ' num2str(i) ' face ao critério ' num2str(j) ':'];
224 d(i,j)= input(r161);
225 end
226 end
227
228 r1611=['A matriz de decisão-TOPSIS é:'];
229 disp(r1611);
230 disp(d);
231
232 %2.6.2.Normalização da matriz de decisão dos elementos de júri-[r]
233 r=[];
234 r=d/norm(d);
235
236 r162=['A matriz de decisão normalizada-TOPSIS é:'];
237 disp(r162);
238 disp(r);

```

```

239
240 %2.6.3.Ponderação dos critérios na matriz de decisão normalizada júri [v]
241 v=[];
242
243 for i=1:ndim1
244     for j=1:ndim
245         v(i,j)=r(i,j)*v_prior(j);
246     end
247 end
248
249 r163=['A matriz de decisão ponderada normalizada-TOPSIS é:'];
250 disp(r163);
251 disp(v);
252
253 %2.6.4.Determinação das distâncias ideais-positivas (vp) e distâncias
254 %ideais-negativas (vn)-TOPSIS
255 %% Vetores e matrizes auxiliares
256 dpos=[];
257 ap=[];
258 dp=[];
259 dneg=[];
260 an=[];
261 dn=[];
262
263 %Determinar vp e vn em cada critério
264
265 for i=1:ndim
266
267     ap(i)=max(v(:,i));
268     an(i)=min(v(:,i));
269
270 end
271
272 for i=1:ndim1
273     for j=1:ndim
274         dpos(i,j)=(v(i,j)-ap(1,j))^2;
275         dneg(i,j)=(v(i,j)-an(1,j))^2;
276     end
277     dp(i,1)=sqrt(sum(dpos(i,:)));
278     dn(i,1)=sqrt(sum(dneg(i,:)));
279 end
280
281 r1641=['Di*'];
282 disp(r1641);
283 disp(dp);
284
285 r1642=['Di-'];
286 disp(r1642);
287 disp(dn);
288
289 %2.6.5.Determinar o coeficiente de aproximação
290 cc_juri=[];
291
292 for i=1:ndim1
293
294     cc_juri(i,1)=dn(i,1)/(dp(i,1)+dn(i,1));
295
296 end
297
298 %2.6.6.Exposição de resultados do coef. aproximação associado a cada elemento de júri

```

```

299
300 for i=1:ndim1
301 r176=['O peso do júri ' num2str(i) ' na avaliação é de:' num2str(cc_juri(i))];
302 disp(r176);
303 end
304
305 %2.6.7.Exposição de resultados do coef. aproximação associado a cada elemento de
júri
306
307 for i=1:ndim1
308 r176=['O peso do elemento de júri ' num2str(i) ' na avaliação é de:' num2str
(p_juri(i))];
309 disp(r176);
310 end
311 %% 2.7-Guardar pesos de tomada de decisão dos elementos de júri
312 sq3=questdlg('Deseja guardar resultados do estudo?','Opção de guardar');
313
314 if strcmp(sq3,'Yes')
315 sq4=input('Indique o nome do ficheiro a guardar: ');
316 save(sq4);
317 end
318
319 r18=['Fim da análise'];
320 disp(r18);
321 %%Fim da análise

```

Anexo VII

Explicação do algoritmo da metodologia *Fuzzy-FMEA*

A fim de explicar os passos do algoritmo construído, realizar-se-á uma análise de cada subconjunto de instruções presente no algoritmo da metodologia proposta *Fuzzy-FMEA*.

3- Introdução à metodologia *Fuzzy-FMEA* (linha 1 – linha 11)

Linhas de código	Operação a executar
2-3	Funções que permitem eliminar as variáveis existentes em memória como eliminar as variáveis e exposição de dados resultantes no <i>Command Window</i> . Permite disponibilizar computacionalmente os recursos para a análise a realizar.
4-5	Exposição de uma mensagem introdutória ao utilizador.
7-11	Exposição de uma caixa diálogo, introduzindo a ordem por parte do utilizador de carregar um ficheiro de dados obtidos em análises anteriores.

3.1.1- Termos linguísticos do critério de severidade difusa (linha 12 – linha 24)

Linhas de código	Operação a executar
14-23	Definição de variáveis que caracterizam os termos linguísticos do critério de severidade difusa.

3.1.2- Termos linguísticos do critério de ocorrência difusa (linha 25 – linha 36)

Linhas de código	Operação a executar
26-35	Definição de variáveis que caracterizam os termos linguísticos do critério de ocorrência difusa.

3.1.3- Termos linguísticos do critério de detetabilidade difusa (linha 37 – linha 48)

Linhas de código	Operação a executar
38-47	Definição de variáveis que caracterizam os termos linguísticos do critério de detetabilidade difusa.

3.1.4- Preparação da avaliação de cada potencial modo de falha e seu registo devido (linha 49 – linha 67)

3.1.4.1- Número de membros da equipa de júri (linha 51 – linha 54)

Linhas de código	Operação a executar
51	Função de instrução ao utilizador para inserir o número de elementos do júri que compõe a equipa de análise.
52-54	Adequação da função <i>loop while</i> para que seja garantido que o número de elementos seja um número positivo e não nulo.

3.1.4.2- Número de potenciais modos de falha (linha 56– linha 61)

Linhas de código	Operação a executar
57	Função de instrução ao utilizador para inserir o número de potenciais modos de falha que sejam pretendidos analisar.
58-60	Adequação da função <i>loop while</i> para que seja garantido que o número de elementos seja um número positivo e não nulo.

3.1.4.3-Desenvolvimento do questionário de avaliação (linha 62– linha 67)

Linhas de código	Operação a executar
64	Construção de uma variável [ms] de estrutura <i>cell-array</i> a fim de armazenar as diferentes avaliações da equipa de júri pelos demais potenciais modos de falha, quanto ao critério de severidade.
65	Construção de uma variável [mo] de estrutura <i>cell-array</i> a fim de armazenar as diferentes avaliações da equipa de júris pelos demais potenciais modos de falha, quanto ao critério de ocorrência.
66	Construção de uma variável [md] de estrutura <i>cell-array</i> a fim de armazenar as diferentes avaliações da equipa de júris pelos demais potenciais modos de falha, quanto ao critério de detetabilidade.

3.2- Avaliações dos critérios difusos (linha 68 – linha 92)

3.2.1- Critério de Severidade difuso (linha 69 – linha 76)

Linhas de código	Operação a executar
70-75	Adequação de dois ciclos <i>for</i> de forma a dar instrução ao utilizador para inserir iterativamente a atribuição dada pelos diversos elementos de júri a cada potencial modo de falha respetivo ao critério de severidade difuso.

3.2.2- Critério de Ocorrência difuso (linha 77 – linha 84)

Linhas de código	Operação a executar
78-83	Adequação de dois ciclos <i>for</i> de forma a dar instrução ao utilizador para inserir iterativamente a atribuição dada pelos diversos elementos de júri a cada potencial modo de falha respetivo ao critério de ocorrência difuso.

3.2.3- Critério de Detetabilidade difuso (linha 85 – linha 92)

Linhas de código	Operação a executar
85-92	Adequação de dois ciclos <i>for</i> de forma a dar instrução ao utilizador para inserir iterativamente a atribuição dada pelos diversos elementos de júri a cada potencial modo de falha respetivo ao critério de detetabilidade difuso.

3.3- Determinar a matriz de decisão difusa (linha 93 – linha 147)

Linhas de código	Operação a executar
95-96	Função de instrução ao utilizador de forma a questionar qual o nome do ficheiro a carregar a fim de inserir os pesos de cada elemento do júri (calculado pela metodologia complementar híbrida <i>AHP-TOPSIS</i>).
97	Conversão do vetor-coluna para vetor-linha (transposta)

3.3.1- Dimensões da matriz de decisão difusa e dimensões do vetor de ponderação dos elementos de júri (linha 100 – linha 104)

Linhas de código	Operação a executar
102-103	Adequação de duas funções <i>size</i> [I] e [Is] a fim de determinar a dimensão da matriz de decisão difusa.

3.3.2- Cálculos auxiliares à construção da matriz de decisão difusa (linha 105 – linha 117)

Linhas de código	Operação a executar
108-116	Adequação de dois ciclos <i>for</i> de forma a determinar iterativamente a avaliação ponderada dos critérios respeitante a cada potencial modo de falha [msp], [mop], [mdp].

3.3.3- Agregação das decisões ponderadas difusas da equipa do júri (linha 118 – linha 132)

Linhas de código	Operação a executar
119-121	Construção de matrizes preenchidas por zeros na sua totalidade de forma a auxiliarem o processo de agregação dos resultados ponderados dos diferentes elementos de júri [var1], [var2], [var3].
123-131	Processo de cálculo iterativo de agregação das avaliações ponderadas.

3.3.4- Construção da matriz de decisão difusa (linha 133 – linha 147)

Linhas de código	Operação a executar
134-143	Criação de duas variáveis [sz] e [sz1] de forma a constituir dois vetores fulcrais ao processo de transformação da matriz de decisão difusa de estrutura <i>matrix</i> para uma estrutura <i>cell-array</i> .
145-146	Processo de transformação da matriz de decisão difusa de estrutura <i>matrix</i> para uma estrutura <i>cell-array</i> de forma a manter a coerência das estruturas de armazenamento de dados.

3.4- Matriz de decisão normalizada difusa baseada no critério de benefício (linha 148 – linha 159)

Linhas de código	Operação a executar
150	Determinação dos valores atribuído máximos das avaliações presentes da matriz de decisão difusa (em cada coluna).
152	Criação de uma estrutura de <i>cell-array</i> a fim de armazenar os demais dados resultantes do processo de normalização difuso.
154-158	Adequação de dois ciclos <i>for</i> de forma a calcular iterativamente cada elemento da matriz de decisão normalizada difusa.

3.5- Matriz de decisão ponderada normalizada difusa (linha 160 – linha 174)

Linhas de código	Operação a executar
163-165	Função de instrução ao utilizador para introduzir o nome do ficheiro com os pesos de ponderação de cada critério de avaliação dos potenciais modos de falha.
167-171	Cálculo da ponderação em cada critério respetivo com a adequação de um ciclo <i>for</i> de forma a automatizar iterativamente o cálculo.
173	Conversão da matriz ponderada difusa em estrutura <i>cell-array</i> para uma estrutura <i>do tipo matrix</i> [vmat].

3.6- Cálculos das distâncias ideais-positivas difusas e as distâncias ideais-negativas difusas (linha 175 – linha 198)

3.6.1- Consideração das distâncias ideais-positivas e ideais-negativas (linha 177 – linha 190)

Linhas de código	Operação a executar
179	Criação da variável da melhor distância ideal-positiva difusa [Ap].
180	Criação da variável da pior distância ideal-negativa difusa [An].
182-189	Processo de conversão iterativo em determinar as distâncias ideais positivas e negativas respeitantes à avaliação de cada critério e de converter o resultado difuso para formato escalar pelo método COA, resultando dois vetores cujas variáveis são [dp] e [dn].

**3.6.2- Cálculo dos vetores de distâncias ideais-positivas e ideais-negativas
(linha 191 – linha 198)**

Linhas de código	Operação a executar
192	Criação de uma variável a fim de constituir um armazenamento dos cálculos do coeficiente de aproximação [Cc].
194-197	Processo iterativo a fim de determinar cada coeficiente de aproximação para cada potencial modo de falha.

3.7- Construção de uma tabela de exposição de resultados (linha 199 – linha 208)¹⁴

Linhas de código	Operação a executar
200	Construção de uma tabela com os potenciais de modos de falha numerados bem como o coeficiente de aproximação respetivo.
201-203	Exposição dos resultados anteriormente calculados.
205-206	Exposição de uma mensagem de texto a informar o utilizador que a análise terminou.

¹⁴ **Nota:** As linhas não-numeradas nas “Linhas de código” das tabelas acima expostas, devem-se à particularidade de constituírem linhas em vazio ou preenchidas com títulos a fim de estruturar o algoritmo do presente Anexo.

Anexo VIII

Algoritmo da metodologia híbrida *Fuzzy-FMEA*

[código de *Matlab*]

```

1 %%3.Introdução à metodologia Fuzzy-FMEA
2 clear all;
3 clc;
4 r1=['Metodologia Fuzzy-FMEA'];
5 disp(r1);
6
7 qn1=questdlg('Carregar dados de avaliação?','OPÇÕES');
8 if strcmp(qn1,'Yes')
9     q11=input('Indique o nome do ficheiro a carregar: ');
10    load(q11);
11 else
12 %%3.1.1.Termos linguísticos da severidade- difusa
13
14 mp=[9 10 10]; %Muito perigoso
15 p=[8 9 10]; %Perigoso
16 e=[7 8 9]; %Elevado
17 m=[6 7 8]; %Moderado
18 s=[5 6 7]; %Significante
19 md=[4 5 6]; %Médio
20 b=[3 4 5]; %Baixo
21 pq=[2 3 4]; %Pequeno
22 mpq=[1 2 3]; %Muito pequeno
23 n=[0 1 2]; %Nenhum
24
25 %%3.1.2.Termos linguísticos da ocorrência- difusa
26 ma=[9 10 10]; %Muito alta
27 aiii=[8 9 10]; %Alta III
28 aii=[7 8 9]; %Alta II
29 ai=[6 7 8]; %Alta I
30 miii=[5 6 7]; %Moderada III
31 mii=[4 5 6]; %Moderada II
32 mi=[3 4 5]; %Moderada I
33 pii=[2 3 4]; %Pequena II
34 pi=[1 2 3]; %Pequena I
35 mp=[0 1 2]; %Muito pequena
36
37 %%3.1.3.Termos linguísticos da ocorrência- difusa
38 nh=[9 10 10]; %Nenhuma
39 ri=[8 9 10]; %Rara I
40 rii=[7 8 9]; %Rara II
41 bi=[6 7 8]; %Baixa I
42 bii=[5 6 7]; %Baixa II
43 agl=[4 5 6]; %Alguma
44 mod=[3 4 5]; %Moderada
45 a=[2 3 4]; %Alta
46 mai=[1 2 3]; %Muito alta
47 c=[0 1 2]; %Certa
48
49 %3.1.4.Preparação da avaliação de cada FM e seu registo devido
50 %3.1.4.1.Nº membros da equipa do júri
51 k=input('Indique o nº de membros que constituem a equipa do júri: ');
52 while k<0
53 fm=input('Indique quantos potenciais modos de falha pretende avaliar : ');
54 end
55
56 %3.1.4.2.Nº potenciais modos de falha
57 fm=input('Indique quantos potenciais modos de falha pretende avaliar : ');
58 while fm<0
59 fm=input('Indique quantos potenciais modos de falha pretende avaliar : ');
60 end

```

```

61
62 %3.1.4.3.Desenvolvimento do questionário de avaliação:
63 %Registo da avaliação de cada membro da equipa para os demais potenciais modos de
falha:
64 ms=cell(fm,k);
65 mo=cell(fm,k);
66 md=cell(fm,k);
67
68 %% 3.2.Avaliação dos seguintes critérios difusos:
69 %3.2.1.Critério de Severidade difuso
70 for i=1:fm
71     for j=1:k
72         r21=['Severidade- M.F ', num2str(i), ' do Júri ' num2str(j) ' : '];
73         ms{i,j}=input(r21);
74     end
75 end
76
77 %3.2.2.Critério de Ocorrência difuso
78     for i=1:fm
79         for j=1:k
80             r22=['Ocorrência- M.F ', num2str(i), ' do Júri ' num2str(j) ' : '];
81             mo{i,j}=input(r22);
82         end
83     end
84
85 %3.2.3.Critério de Detetabilidade difuso
86     for i=1:fm
87         for j=1:k
88             r23=['Detectabilidade- M.F ', num2str(i), ' do Júri ' num2str(j) ' : '];
89             md{i,j}=input(r23);
90         end
91     end
92 end
93 %% 3.3.Determinar matriz de decisão difusa [D~]
94
95 q3=input('Indique o nome do ficheiro dos pesos do júri a carregar: ');
96 load(q3,'cc_juri'); %Extrai o vetor de ponderação dos membros de equipa resultante
da metodologia AHP
97 wcrit_juri=transpose(cc_juri);
98 % wcrit_juri=[0.5 0.5];
99
100 %%3.3.1.Dimensões da matriz de decisão difusa [D~]/Dimensões do vetor de
ponderação do vetor de
101 %%ponderação dos elementos de júri.
102 l=size(ms);
103 ls=size(wcrit_juri);
104
105 %%3.3.2.Cálculos auxiliares à construção da matriz de decisão difusa[D~]
106 %%Ponderação de cada decisão de cada elemento do júri
107
108 for i=1:l(1)
109     for j=1:ls(2)
110
111 msp{i,j}=wcrit_juri(1,j)*ms{i,j};
112 mop{i,j}=wcrit_juri(1,j)*mo{i,j};
113 mdp{i,j}=wcrit_juri(1,j)*md{i,j};
114
115     end
116 end
117

```

```

118 %%3.3.3.Agregação das decisões ponderadas difusas da equipa do júri
119 var1=zeros(l(1),3);
120 var2=zeros(l(1),3);
121 var3=zeros(l(1),3);
122
123 for i=1:l(1)
124     for j=1:ls(2)
125
126         var1(i,:)=var1(i,)+msp{i,j};
127         var2(i,:)=var2(i,)+mop{i,j};
128         var3(i,:)=var3(i,)+mdp{i,j};
129
130     end
131 end
132
133 %%3.3.4.Construção da matriz de decisão difusa [D~]
134 sz=[];
135 sz1=[];
136
137 for j=1:l(1)
138     sz(j)=1;
139 end
140
141 for j=1:3
142     sz1(j)=3;
143 end
144
145 d_aux=[var1,var2,var3];
146 d=mat2cell(d_aux,sz,sz1);
147
148 %% 3.4.Matriz de decisão normalizada difusa [R~] baseada no critério de benefício
149
150 cj=max(d_aux); %cj*=max cij
151
152 r=cell(l(1),l(2));
153
154 for i=1:l(1)
155     for j=1:3
156         r{i,j}=d{i,j}/cj(1,j*3);
157     end
158 end
159
160 %% 3.5.Matriz ponderada normalizada difusa[V~]
161 %Vetor de pesos de ponderação de cada critério
162
163 q5=input('Indique o nome do ficheiro dos pesos dos critérios a carregar: ');
164 load(q5,'p_rel');
165 %p_rel=[1/3 1/3 1/3];
166
167 for i=1:l(1)
168     v{i,1}=r{i,1}*p_rel(1);
169     v{i,2}=r{i,2}*p_rel(2);
170     v{i,3}=r{i,3}*p_rel(3);
171 end
172
173 vmat=cell2mat(v); %Conversão de estrutura array para estrutura matriz
174
175 %% 3.6.Cálculos das distâncias ideais-positivas difusas (dp~) e das distâncias
176 %ideais-negativas difusa (dn~)
177 %3.6.1.Considera-se A*(1,1,1)distância ideal positiva e A-(0,0,0) distância ideal

```

```

178 %negativa
179 Ap=[1 1 1];
180 An=[0 0 0];
181
182 for i=1:l(1)
183     for j=1:3:7
184         dpos(i,j)=sqrt(1/3*((vmat(i,j)-Ap(1))^2+(vmat(i,j+1)-Ap(2))^2+(vmat(i,j+2)
-Ap(3))^2));
185         dneg(i,j)=sqrt(1/3*((vmat(i,j)-An(1))^2+(vmat(i,j+1)-An(2))^2+(vmat(i,j+2)
-An(3))^2));
186     end
187     dp(i,1)=sum(dpos(i,:));
188     dn(i,1)=sum(dneg(i,:));
189 end
190
191 %3.6.2.Cálculo do coeficiente de aproximação Cci para todos os M.F
192 Cc=[];
193
194 for i=1:l(1)
195     Cc(i,1)=i;
196     Cc(i,2)=dn(i)/(dp(i)+dn(i));
197 end
198
199 %% 3.7.Construção de uma tabela de exposição de resultados
200 r71=table(Cc(:,1),Cc(:,2),'VariableNames',{'Modo_falha','Coef_proximidade'});
201 r72=['A priorização dos potenciais modos de falha pela metodologia Fuzzy-FMEA:'];
202 disp(r72);
203 disp(r71)
204
205 r8=['Fim da análise'];
206 disp(r8);
207
208 %% Fim da análise

```

Anexo IX
Análise FMEA – Secador Industrial

Equipamento		Secador Industrial TSK S-CD (M1-423)					Orientado por:		Prof. José Sobral							
Equipa:		Júri 1					Preparado por:		Nuno Antunes							
Nº Pot. Modo de Falha	Sistema principal	Subsistema	Item	Função	Potencial modo de falha	Potencial causa de falha	Potencial efeito de falha				Severidade	Ocorrência	Detetabilidade	RPN	Ranking	
							Saúde e Segurança	Meio ambiente	Custo de não produção	Custo de reparação						
1	SPS	Motor	Sistema elétrico	Fornecer corrente elétrica	Motor não arranca	Interrupção do fornecimento de corrente elétrica.	1	1	2	1	2	6	2	24	65	
2						Cabos danificados devido a choques mecânicos.	1	1	2	2	2	2	4	16	79	
3						Cabos queimados devido a choques mecânicos.	1	1	2	2	2	2	4	16	80	
4						Avaria no arrancador.	1	1	2	2	2	2	2	8	98	
5					Motor pára durante a operação	Sobrecarga mecânica.	1	1	2	1	2	6	2	24	66	
6						Falta de uma ou mais fases.	1	1	2	2	2	2	4	16	81	
7						Desequilíbrio de tensão.	1	1	2	2	2	2	2	8	99	
8						Quedas de tensão.	1	1	2	2	2	2	2	8	100	
9			Estator	Promover campo magnético	Avaria do estator	Acumulação de sujidade nas alhetas de refrigeração.	1	1	2	2	2	6	1	12	92	
10						Enrolamentos com humidade.	1	1	2	2	2	2	2	8	101	
11						Falhas de isolamento.	1	1	2	2	2	2	2	8	102	
12						Arranques frequentes.	1	1	2	1	2	4	2	16	82	
13							Pata coxa.	1	1	2	2	2	4	6	48	29
14			Rotor	Fornecer energia mecânica ao motor	Avaria do rotor	Barras do rotor partidas.	1	1	4	4	4	2	6	48	30	
15						Acumulação de sujidade nas alhetas de refrigeração.	1	1	2	2	2	6	1	12	93	
16						Excentricidade estática e dinâmica (falhas entreferro).	1	1	2	4	4	2	6	48	31	
17						Falhas de isolamento.	1	1	2	2	2	2	2	8	103	
18					Pata coxa.	1	1	2	2	2	4	6	48	32		
19					Falhas dos rolamentos	Lubrificação incorreta.	1	1	4	2	4	2	2	16	83	
20						Rotor desequilibrado.	1	1	4	4	4	2	6	48	33	
21						Desalinhamento do veio.	1	1	4	4	4	6	6	144	4	
22			Ajustes mecânicos incorretos.	1		1	4	2	4	2	6	48	34			
23			Chumaceiras de rolamentos defeituosas.	1	1	4	2	4	1	6	24	67				
24			Fratura do veio	Flexão/fadiga torsional proveniente do desalinhamento.	1	1	4	4	4	1	6	24	68			
25				Sobrecarga durante a operação.	1	1	4	4	4	2	10	80	11			
26				Rotor bloqueado.	1	1	4	4	4	2	4	32	50			
27				Danos provocados durante a ação de manutenção.	1	1	4	4	4	1	8	32	51			
28			Defeitos de fabrico.	1	1	4	4	4	1	8	32	52				

Equipamento		Secador Industrial TSK S-CD (M1-423)				Orientado por:		Prof. José Sobral							
Equipa:		Júri 1				Preparado por:		Nuno Antunes							
Nº Pot. Modo de Falha	Sistema principal	Subsistema	Item	Função	Potencial modo de falha	Potencial causa de falha	Potencial efeito de falha				Severidade	Ocorrência	Detetabilidade	RPN	Ranking
							Saúde e Segurança	Meio ambiente	Custo de não produção	Custo de reparação					
29	SPS	Acoplamentos	Acoplamento hidráulico	Convertor de binário/ Fornece um arranque suave e macio	Avaria no acoplamento	Sobreaquecimento.	1	1	2	2	2	4	2	16	84
30						Deformação das lâminas.	1	1	4	4	4	2	8	64	19
31						Quebra do estator.	1	1	4	4	4	2	8	64	20
32						Vedantes danificados/ressequidos.	1	2	1	2	2	4	2	16	85
33						Bujão-fusível derretido.	4	2	2	2	4	4	1	16	86
34			Fluido hidráulico insuficiente.	1	1	2	2	2	4	1	8	104			
35			Acoplamento flexível de pinos	Transferir binário	Avaria no acoplamento	Desalinhamento do veio.	1	1	2	2	2	4	6	48	35
36						Veios empenados, excentricidade excessiva.	1	1	2	4	4	2	6	48	36
37						Vida útil limitada dos elastómeros.	1	1	2	2	2	6	1	12	94
38						Vibrações torcionais.	1	1	2	2	2	2	6	24	69
39		Binário elevado aplicado na chaveta.				1	1	2	2	2	4	4	32	53	
40		Redutor	Redutor	Fornecer binário/conversões de velocidade	Falhas dos rolamentos	Lubrificação incorreta.	1	1	4	2	4	4	2	32	54
41						Ajustes mecânicos incorretos.	1	1	4	2	4	1	6	24	70
42						Chumaceiras de rolamentos defeituosas.	1	1	4	2	4	1	6	24	71
43						Lascamento de material nas engrenagens.	1	1	4	4	4	1	6	24	72
44					Desgaste da superfície dos dentes das engrenagens	Partículas abrasivas.	1	1	4	4	4	2	6	48	37
45						Lubrificação incorreta.	1	1	4	4	4	4	2	32	55
46						Corrosão por "pitting".	1	1	4	4	4	2	8	64	21
47						Lascagem por "spalling".	1	1	4	4	4	1	6	24	73
48						Sulcos e arranhões "scoring & scuffing".	1	1	4	4	4	1	8	32	56
49						Deformação plástica por movimento de rolamento.	1	1	4	4	4	1	8	32	57
50		Deformação plástica por impacto nos dentes.	1	1	4	4	4	2	8	64	22				
51		Corrosão por ataque químico/água/humidade.	1	1	4	4	4	1	2	8	105				
52		Quebra de dentes nas engrenagens	Cargas cíclicas, torsão e compressão.	1	1	4	4	4	1	6	24	74			
53			Sobrecarga durante a operação.	1	1	4	4	4	2	6	48	38			
54			Cargas de impactos repentinas.	1	1	4	4	4	1	4	16	87			

Equipamento		Secador Industrial TSK S-CD (M1-423)					Orientado por:		Prof. José Sobral									
Equipa:		Júri 1					Preparado por:		Nuno Antunes									
Nº Pot. Modo de Falha	Sistema principal	Subsistema	Item	Função	Potencial modo de falha	Potencial causa de falha	Potencial efeito de falha				Severidade	Ocorrência	Detetabilidade	RPN	Ranking			
							Saúde e Segurança	Meio ambiente	Custo de não produção	Custo de reparação								
55	SPS	Tambor secador	Coroa dentada e pinhão	Permite transmissão do binário do motor ao tambor do secador	Desgaste superficial dos dentes das engrenagens	Partículas abrasivas.	1	1	6	6	6	6	2	72	16			
56						Lubrificação incorreta.	1	1	6	6	6	4	2	48	39			
57						Corrosão por "pitting".	1	1	6	6	6	4	8	192	1			
58						Lascagem por "spalling".	1	1	6	6	6	2	4	48	40			
59						Sulcos e arranhões "scoring & scuffing".	1	1	6	6	6	1	6	36	47			
60						Deformação plástica por movimento do rolamento.	1	1	6	6	6	1	2	12	95			
61						Deformação plástica por impacto nos dentes.	1	1	6	6	6	2	2	24	75			
62						Corrosão por ataque químico/água/humidade.	1	1	6	6	6	4	2	48	41			
63						Quebra de dentes nas engrenagens	Fratura de dentes das engrenagens	Cargas cíclicas, torsão e compressão.	1	1	6	6	6	1	6	36	48	
64									Sobrecarga durante a operação.	1	1	6	6	6	2	6	72	17
65									Cargas de impactos repentinas.	1	1	6	6	6	1	4	24	76
66						Sistema de secagem	Secar o produto	Eficiência do processo de secagem anormal ou deficiente	A superfície do tambor não está isolada.	1	1	1	8	8	1	6	48	42
67									Tubos de aquecimento (vapor) com ar.	1	1	1	2	2	8	2	32	58
68									Quantidade de vapor insuficiente.	1	1	1	1	1	8	1	8	106
69			Condensado de vapor não é descarregado corretamente.	1	1				1	2	2	6	1	12	96			
70			Tambor secador	Conter e agitar o produto a ser seco e gás inerte	Deterioração do tambor	Caudal de gás inerte muito baixo.	1	1	1	1	1	6	1	6	110			
71						Tensões nos tubos de aq. devido à expansão térmica.	1	1	10	8	10	1	6	60	27			
72							Tensões no tambor devido à expansão térmica.	1	1	10	8	10	1	8	80	12		
73							Tensões nos tubos de aq. devido à expansão térmica.	1	1	10	6	10	1	8	80	14		
74						Fornecer calor sob forma de vapor ao secador	Rotura dos tubos	Corrosão-erosão.	1	1	10	6	10	2	6	120	5	
75								Suportes internos danificados.	1	1	10	6	10	2	2	40	46	
76			Corrosão sob tensão.	1	1			10	6	10	1	6	60	28				
77			Anel de rolamento (guiado e livre)	Desgaste do anel de rolamento	Lubrificação incorreta.	1	1	8	8	8	6	1	48	43				
78					Corrosão por "pitting".	1	1	8	8	8	4	6	192	2				
79					Desalinhamento vertical e horizontal.	1	1	8	8	8	4	6	192	3				
80					Lubrificação insuficiente no anel do rolamento.	1	1	8	8	8	2	2	32	59				
81					Adesão de poeiras na superfície.	1	1	8	8	8	4	2	64	23				
82																		

Equipamento		Secador Industrial TSK S-CD (M1-423)				Orientado por:		Prof. José Sobral								
Equipa:		Júri 1				Preparado por:		Nuno Antunes								
Nº Pot. Modo de Falha	Sistema principal	Subsistema	Item	Função	Potencial modo de falha	Potencial causa de falha	Potencial efeito de falha				Severidade	Ocorrência	Detetabilidade	RPN	Ranking	
							Saúde e Segurança	Meio ambiente	Custo de não produção	Custo de reparação						
83	SPS	Tambor secador	Rolos, veios e rolamentos	Suportam o secador	Fratura do veio	Sobrecarga durante a operação.	1	1	6	4	6	2	6	72	18	
84						Danos provocados durante a ação de manutenção.	1	1	6	4	6	1	6	36	49	
85						Corrosão por "pitting".	1	1	6	4	6	1	8	48	44	
86						Rolamentos gripados.	1	1	6	4	6	2	4	48	45	
87					Falha dos rolamentos	Lubrificação incorreta.	1	1	4	4	4	2	2	16	88	
88						Desalinhamento do veio.	1	1	4	4	4	4	6	96	7	
89						Ajustes mecânicos incorretos.	1	1	4	4	4	4	6	96	8	
90						Chumaceiras de rolamentos defeituosas.	1	1	4	4	4	1	6	24	77	
91						Desgaste dos rolos	Lubrificação incorreta.	1	1	4	4	4	6	1	24	78
92							Desalinhamento dos veios.	1	1	4	4	4	4	4	64	24
93		Corrosão por "pitting".	1	1	4		4	4	4	6	96	9				
94		Ajustes mecânicos incorretos.	1	1	4		4	4	2	4	32	60				
95		Rolamentos gripados.	1	1	4	4	4	2	4	32	61					
96		Adesão de poeiras na superfície.	1	1	4	4	4	4	2	32	62					
97		Junta rotativa	Fornecer vapor ao colector de distribuição de vapor e descarregar o condensado	Desgaste da superfície dos vedantes	Binário excessivo.	1	1	1	2	2	1	6	12	97		
98					Deterioração do revestimento superficial.	1	1	1	2	2	2	4	16	89		
99					Presença dos contaminantes.	1	1	1	2	2	2	8	107			
100					Operação a seco.	1	1	1	2	2	8	1	16	90		
101				Fratura dos vedantes	Corrosão sob tensão.	1	1	4	2	4	4	6	96	10		
102					Ajustes mecânicos incorretos.	1	1	4	2	4	2	4	32	63		
103	Temperatura elevada.				1	1	4	2	4	4	4	64	25			
104	Falhas das juntas			Temperatura elevada.	1	1	4	2	4	4	4	64	26			
105		Montagem instalação incorreta.	1	1	4	2	4	2	2	16	91					
106	Degradação molas	Corrosão uniforme.	1	1	4	2	4	2	1	8	108					
107	Estrutura	Estrutura metálica	Assegurar a rigidez do equipamento	Estrutura solta	Desaperto dos parafusos/ suportes degradados.	4	1	1	2	4	2	1	8	109		
108					Vibração excessiva.	4	1	1	2	4	2	4	32	64		
109	Fundações	Fundações	Suportam a estrutura	Colapso das fundações	Terreno inadequado.	8	4	10	8	10	1	8	80	15		
110					Subdimensionamento das fundações.	8	4	10	8	10	1	10	100	6		

Anexo X
Avaliação *Fuzzy-FMEA* - elementos do júri

Equipamento		Secador Industrial TSK S-CD (M1-423)				Orientado por:			Prof. José Sobral			
Equipa:		Júri 1				Preparado por:			Nuno Antunes			
Nº Pot. Modo de Falha	Sistema principal	Subsistema	Item	Função	Potencial modo de falha	Potencial causa de falha	Aval. J-1			Aval. J-2		
							Severidade	Ocorrência	Detetabilidade	Severidade	Ocorrência	Detetabilidade
1	SPS	Motor	Sistema elétrico	Fornecer corrente elétrica	Motor não arranca	Interrupção do fornecimento de corrente elétrica.	MPQ	MIII	MAI	MPQ	MIII	MAI
2						Cabos danificados devido a choques mecânicos.	PQ	PI	ALG	MPQ	PI	MOD
3						Cabos queimados devido a choques mecânicos.	PQ	PI	MOD	MPQ	PI	MOD
4						Avaria no arrancador.	MPQ	PI	MAI	MPQ	PI	MAI
5					Motor pára durante a operação	Sobrecarga mecânica.	PQ	MIII	A	MPQ	MIII	MAI
6						Falta de uma ou mais fases.	MPQ	PI	MOD	MPQ	PI	MOD
7						Desequilíbrio de tensão.	MPQ	PI	A	MPQ	PI	MAI
8						Quedas de tensão.	MPQ	PI	A	MPQ	PI	MAI
9			Estator	Promover campo magnético	Avaria do estator	Acumulação de sujidade nas alhetas de refrigeração.	MPQ	MIII	MAI	MPQ	MIII	C
10						Enrolamentos com humidade.	MPQ	PI	A	MPQ	PI	MAI
11						Falhas de isolamento.	PQ	PI	A	MPQ	PI	MAI
12						Arranques frequentes.	MPQ	MI	MAI	MPQ	MI	MAI
13						Pata coxa.	MPQ	MI	BI	MPQ	MI	BII
14			Rotor	Fornecer energia mecânica ao motor	Avaria do rotor	Barras do rotor partidas.	MD	PI	BI	B	PI	BII
15						Acumulação de sujidade nas alhetas de refrigeração.	MPQ	MIII	MAI	MPQ	MIII	C
16						Excentricidade estática e dinâmica (falhas entreferro).	S	PI	ALG	B	PI	BII
17						Falhas de isolamento.	MPQ	PI	A	MPQ	PI	MAI
18					Pata coxa.	PQ	MI	BI	MPQ	MI	BII	
19					Falhas dos rolamentos	Lubrificação incorreta.	PQ	PI	A	B	PI	MAI
20						Rotor desequilibrado.	MD	PI	BI	B	PI	BII
21						Desalinhamento do veio.	B	MIII	BI	B	MIII	BII
22			Ajustes mecânicos incorretos.	B		PI	BI	B	PI	BII		
23			Chumaceiras de rolamentos defeituosas.	MD	MP	BI	B	MP	BII			
24			Fratura do veio	Flexão/fadiga torsional originado por desalinhamento.	B	MP	BII	B	MP	BII		
25				Sobrecarga durante a operação.	MD	PI	NH	B	PI	NH		
26				Rotor bloqueado.	B	PI	A	B	PI	MOD		
27				Danos provocados durante a ação de manutenção.	PQ	MP	RII	B	MP	RII		
28			Defeitos de fabrico.	MD	MP	RII	B	MP	RII			

Equipamento		Secador Industrial TSK S-CD (MI-423)				Orientado por:			Prof. José Sobral			
Equipa:		Júri 1				Preparado por:			Nuno Antunes			
Nº Pot. Modo de Falha	Sistema principal	Subsistema	Item	Função	Potencial modo de falha	Potencial causa de falha	Aval. J-1			Aval. J-2		
							Severidade	Ocorrência	Detetabilidade	Severidade	Ocorrência	Detetabilidade
29	SPS	Acoplamentos	Acoplamento hidráulico	Conversor de binário/ Fornece um arranque suave e macio	Avaria no acoplamento	Sobreaquecimento.	PQ	MI	A	MPQ	MI	MAI
30						Deformação das lâminas.	MD	PI	RI	B	PI	RII
31						Quebra do estator.	PQ	PI	RI	B	PI	RII
32						Vedantes danificados/ressequidos.	PQ	MI	A	MPQ	MI	MAI
33						Bujão-fusível derretido.	B	MI	MAI	B	MI	C
34			Fluído hidráulico insuficiente.	PQ	MI	MAI	MPQ	MI	C			
35			Acoplamento flexível de pinos	Transferir binário	Avaria no acoplamento	Desalinhamento do veio.	PQ	MI	BI	MPQ	MI	BII
36						Veios empenados, excentricidade excessiva.	MD	PI	ALG	B	PI	BII
37						Vida útil limitada dos elastómeros.	PQ	MIII	MAI	MPQ	MIII	C
38						Vibrações torcionais.	PQ	PI	ALG	MPQ	PI	BII
39		Binário elevado aplicado na chaveta.				PQ	MI	A	MPQ	MI	MOD	
40		Redutor	Redutor	Fornecer binário/conversões de velocidade	Falhas dos rolamentos	Lubrificação incorreta.	B	MI	A	B	MI	MAI
41						Ajustes mecânicos incorretos.	B	MP	ALG	B	MP	BII
42						Chumaceiras de rolamentos defeituosas.	MD	MP	BI	B	MP	BII
43						Lascamento de material nas engrenagens.	PQ	MP	BI	B	MP	BII
44						Desgaste da superfície dos dentes das engrenagens	Partículas abrasivas.	B	PI	BI	B	PI
45					Lubrificação incorreta.		B	MI	A	B	MI	MAI
46					Corrosão por "pitting".		B	PI	BI	B	PI	RII
47					Lascagem por "spalling".		PQ	MP	BI	B	MP	BII
48					Sulcos e arranhões "scoring & scuffing".		MD	MP	RII	B	MP	RII
49					Deformação plástica por movimento de rolamento.	B	MP	RII	B	MP	RII	
50		Deformação plástica por impacto nos dentes.	MD	PI	RII	B	PI	RII				
51		Corrosão por ataque químico/água/humidade.	PQ	MP	A	B	MP	MAI				
52		Quebra de dentes nas engrenagens	Cargas cíclicas, torsão e compressão.	MD	MP	BI	B	MP	BII			
53	Sobrecarga durante a operação.		MD	PI	ALG	B	PI	BII				
54	Cargas de impactos repentinas.		MD	MP	ALG	B	MP	MOD				

Equipamento		Secador Industrial TSK S-CD (M1-423)					Orientado por:			Prof. José Sobral				
Equipa:		Júri 1					Preparado por:			Nuno Antunes				
Nº Pot. Modo de Falha	Sistema principal	Subsistema	Item	Função	Potencial modo de falha	Potencial causa de falha	Aval. J-1			Aval. J-2				
							Severidade	Ocorrência	Detetabilidade	Severidade	Ocorrência	Detetabilidade		
55	SPS	Tambor secador	Coroa dentada e pinhão	Permite transmissão do binário do motor ao tambor do secador	Desgaste superficial dos dentes das engrenagens	Partículas abrasivas.	S	MIII	A	S	MIII	MAI		
56						Lubrificação incorreta.	S	MI	A	S	MI	MAI		
57						Corrosão por "pitting".	MD	MI	BI	S	MI	RII		
58						Lascagem por "spalling".	S	PI	ALG	S	PI	MOD		
59						Sulcos e arranhões "scoring & scuffing".	S	MP	BII	S	MP	BII		
60						Deformação plástica por movimento do rolamento.	S	MP	A	S	MP	MAI		
61						Deformação plástica por impacto nos dentes.	S	PI	A	S	PI	MAI		
62						Corrosão por ataque químico/água/humidade.	MD	MI	A	S	MI	MAI		
63						Quebra de dentes nas engrenagens	Fratura de dentes das engrenagens	Cargas cíclicas, torsão e compressão.	M	MP	BII	S	MP	BII
64								Sobrecarga durante a operação.	M	PI	BI	S	PI	BII
65			Cargas de impactos repentinas.	M	MP			ALG	S	MP	MOD			
66			Sistema de secagem	Secar o produto	Eficiência do processo de secagem anormal ou deficiente	A superfície do tambor não está isolada.	PQ	MP	ALG	E	MP	BII		
67						Tubos de aquecimento (vapor) com ar.	PQ	AII	A	MPQ	AII	MAI		
68						Quantidade de vapor insuficiente.	MPQ	AII	MAI	N	AII	C		
69						Condensado vapor não é descarregado corretamente.	MPQ	MIII	MAI	MPQ	MIII	C		
70			Caudal de gás inerte muito baixo.	N	MIII	MAI	N	MIII	C					
71			Tambor secador	Conter e agitar o produto a ser seco e gás inerte	Deterioração do tambor	Corrosão por "pitting".	MP	MP	ALG	MP	MP	BII		
72						Tensões nos tubos de aq.devido à expansão térmica.	MP	MP	BI	MP	MP	RII		
73						Tensões no tambor devido à expansão térmica.	MP	MP	BI	MP	MP	RII		
74				Fornecer calor sob forma de vapor ao secador	Rotura dos tubos	Tensões nos tubos de aq. devido à expansão térmica.	MP	MP	RI	MP	MP	RII		
75						Corrosão-erosão.	PQ	PI	BI	MP	PI	BII		
76						Suportes internos danificados.	PQ	PI	A	MP	PI	MAI		
77						Corrosão sob tensão.	PQ	MP	BI	MP	MP	BII		
78				Anel de rolamento (guiado e livre)	Desgaste do anel de rolamento	Lubrificação incorreta.	M	MIII	MAI	E	MIII	C		
79			Corrosão por "pitting".			M	MI	BI	E	MI	BII			
80			Desalinhamento vertical e horizontal.			E	MI	BI	E	MI	BII			
81			Lubrificação insuficiente no anel do rolamento.			E	PI	A	E	PI	MAI			
82			Adesão de poeiras na superfície.			E	MI	A	E	MI	MAI			

Equipamento		Secador Industrial TSK S-CD (M1-423)				Orientado por:			Prof. José Sobral			
Equipa:		Júri 1				Preparado por:			Nuno Antunes			
Nº Pot. Modo de Falha	Sistema principal	Subsistema	Item	Função	Potencial modo de falha	Potencial causa de falha	Aval. J-1			Aval. J-2		
							Severidade	Ocorrência	Detetabilidade	Severidade	Ocorrência	Detetabilidade
83	SPS	Tambor secador	Rolos, veios e rolamentos	Suportam o secador	Fratura do veio	Sobrecarga durante a operação.	E	PI	ALG	S	PI	BII
84						Danos provocados durante a ação de manutenção.	M	MP	BII	S	MP	BII
85						Corrosão por "pitting".	M	MP	BI	S	MP	RII
86						Rolamentos gripados.	E	PI	MOD	S	PI	MOD
87					Falha dos rolamentos	Lubrificação incorreta.	M	PI	A	B	PI	MAI
88						Desalinhamento do veio.	S	MI	ALG	B	MI	BII
89						Ajustes mecânicos incorretos.	MD	MI	BI	B	MI	BII
90						Chumaceiras de rolamentos defeituosas.	MD	MP	BI	B	MP	BII
91					Desgaste dos rolos	Lubrificação incorreta.	PQ	MIII	MAI	B	MIII	C
92						Desalinhamento dos veios.	MD	MI	A	B	MI	MOD
93		Corrosão por "pitting".	B	MI		BII	B	MI	BII			
94		Ajustes mecânicos incorretos.	B	PI		ALG	B	PI	MOD			
95		Rolamentos gripados.	MD	PI		MAI	B	PI	MOD			
96		Adesão de poeiras na superfície.	PQ	MI		A	B	MI	MAI			
97		Junta rotativa	Fornecer vapor ao colector de distribuição de vapor e descarregar o condensado	Desgaste da superfície dos vedantes	Binário excessivo.	MPQ	MP	BI	MPQ	MP	BII	
98					Deterioração do revestimento superficial.	MPQ	PI	ALG	MPQ	PI	MOD	
99					Presença dos contaminantes.	MPQ	PI	A	MPQ	PI	MAI	
100					Operação a seco.	MPQ	AII	MAI	MPQ	AII	C	
101				Fratura dos vedantes	Corrosão sob tensão.	MD	MI	BII	B	MI	BII	
102					Ajustes mecânicos incorretos.	MD	PI	ALG	B	PI	MOD	
103	Falhas das juntas			Temperatura elevada.	B	MI	A	B	MI	MOD		
104				Montagem instalação incorreta.	MD	PI	A	B	PI	MAI		
105	Degradação das molas			Corrosão uniforme.	MD	PI	C	B	PI	C		
106												
107	Estrutura	Estrutura metálica	Assegurar a rigidez do equipamento	Estrutura solta	Desaperto dos parafusos/ suportes degradados.	MD	PI	C	B	PI	C	
108					Vibração excessiva.	PQ	PI	MOD	B	PI	MOD	
109	Fundações	Fundações	Suportam a estrutura	Colapso das fundações	Terreno inadequado.	P	MP	BI	MP	MP	RII	
110					Subdimensionamento das fundações.	MP	MP	NH	MP	MP	NH	

Anexo XI

Exposição dos resultados obtidos do ensaio 1 [*Matlab*]

1	Metodologia Fuzzy-FMEA						
2	Indique o nome do ficheiro a carregar: 'Cs.mat'						
3	A	potenciais modos de	falha	pela	metodologia	Fuzzy-FMEA:	
4	Modo_falha	Coef_proximidade					
5	<hr/>						
6							
7	1	0.12219					
8	2	0.10621					
9	3	0.10077					
10	4	0.074232					
11	5	0.13266					
12	6	0.095545					
13	7	0.079447					
14	8	0.079447					
15	9	0.11712					
16	10	0.079447					
17	11	0.084664					
18	12	0.097915					
19	13	0.14663					
20	14	0.1497					
21	15	0.11712					
22	16	0.14419					
23	17	0.079447					
24	18	0.15188					
25	19	0.095357					
26	20	0.1497					
27	21	0.1924					
28	22	0.14425					
29	23	0.13879					
30	24	0.12787					
31	25	0.18441					
32	26	0.11147					
33	27	0.14442					
34	28	0.15528					
35	29	0.10837					
36	30	0.17173					
37	31	0.16085					
38	32	0.10837					
39	33	0.1142					
40	34	0.098087					
41	35	0.15188					
42	36	0.13872					
43	37	0.12236					
44	38	0.11714					
45	39	0.11908					
46	40	0.12451					
47	41	0.12239					
48	42	0.13879					
49	43	0.12794					
50	44	0.14425					
51	45	0.12451					
52	46	0.15526					
53	47	0.12794					
54	48	0.15528					
55	49	0.14983					

56	50	0.16622
57	51	0.084542
58	52	0.13879
59	53	0.13872
60	54	0.11691
61	55	0.17071
62	56	0.14639
63	57	0.19548
64	58	0.14421
65	59	0.14971
66	60	0.11176
67	61	0.12262
68	62	0.1409
69	63	0.1552
70	64	0.17163
71	65	0.13879
72	66	0.13875
73	67	0.15711
74	68	0.13646
75	69	0.11712
76	70	0.10736
77	71	0.18438
78	72	0.20635
79	73	0.20635
80	74	0.21736
81	75	0.16961
82	76	0.12608
83	77	0.15866
84	78	0.17686
85	79	0.20648
86	80	0.212
87	81	0.14461
88	82	0.1684
89	83	0.16615
90	84	0.1552
91	85	0.17167
92	86	0.14975
93	87	0.11714
94	88	0.16799
95	89	0.17351
96	90	0.13879
97	91	0.13307
98	92	0.14068
99	93	0.16255
100	94	0.12234
101	95	0.11154
102	96	0.11908
103	97	0.11202
104	98	0.10098
105	99	0.079447
106	100	0.14154
107	101	0.16801
108	102	0.12778
109	103	0.13523
110	104	0.13523

111	105	0.10621
112	106	0.091241
113	107	0.091241
114	108	0.11147
115	109	0.20274
116	110	0.23006
117		
118	Fim da análise	

Anexo XII

Exposição dos resultados obtidos do ensaio 2 [*Matlab*]

1 Metodologia Fuzzy-FMEA

2 Indique o nome do ficheiro a carregar: 'CS.mat'

3 Indique o nome do ficheiro dos pesos dos critérios a carregar: 'C.mat'

priorização dos	potenciais modos de	falha	pela	metodologia	Fuzzy-FMEA:
Modo_falha	Coef_proximidade				
:					
6					
7					
8	1	0.10787			
9	2	0.11426			
10	3	0.10697			
11	4	0.073485			
12	5	0.11981			
13	6	0.10203			
14	7	0.080469			
15	8	0.080469			
16	9	0.1011			
17	10	0.080469			
18	11	0.085394			
19	12	0.090466			
20	13	0.1557			
21	14	0.16399			
22	15	0.1011			
23	16	0.15444			
24	17	0.080469			
25	18	0.16066			
26	19	0.095486			
27	20	0.16399			
28	21	0.19338			
29	22	0.15884			
30	23	0.15614			
31	24	0.14365			
32	25	0.21052			
33	26	0.11493			
34	27	0.16797			
35	28	0.17823			
36	29	0.1024			
37	30	0.19349			
38	31	0.18322			
39	32	0.1024			
40	33	0.10383			
41	34	0.088635			
42	35	0.16066			
43	36	0.14928			
44	37	0.10603			
45	38	0.1289			
46	39	0.11674			
47	40	0.11762			
48	41	0.13631			
49	42	0.15614			
50	43	0.14588			
51	44	0.15884			
52	45	0.11762			
53	46	0.17358			
54	47	0.14588			
55	48	0.17823			

56	49	0.17309
57	50	0.18611
58	51	0.087725
59	52	0.15614
60	53	0.14928
61	54	0.12681
62	55	0.1557
63	56	0.13826
64	57	0.20617
65	58	0.15013
66	59	0.16428
67	60	0.11343
68	61	0.12122
69	62	0.13308
70	63	0.16947
71	64	0.18469
72	65	0.14748
73	66	0.15177
74	67	0.13734
75	68	0.11383
76	69	0.1011
77	70	0.091911
78	71	0.19486
79	72	0.22431
80	73	0.22431
81	74	0.23907
82	75	0.18279
83	76	0.12448
84	77	0.17491
85	78	0.15742
86	79	0.2122
87	80	0.2174
88	81	0.14197
89	82	0.15903
90	83	0.17517
91	84	0.16947
92	85	0.19155
93	86	0.15321
94	87	0.11604
95	88	0.17151
96	89	0.18107
97	90	0.15614
98	91	0.11613
99	92	0.13711
100	93	0.16856
101	94	0.12948
102	95	0.11286
103	96	0.1125
104	97	0.13083
105	98	0.10932
106	99	0.080469
107	100	0.1186
108	101	0.17371
109	102	0.13462
110	103	0.13197

111	104	0.13197
112	105	0.10573
113	106	0.085695
114	107	0.085695
115	108	0.11707
116	109	0.22089
117	110	0.25611
118		
119	Fim da análise	
120	>>	

Anexo XIII

Exposição dos resultados obtidos do ensaio 3 [*Matlab*]

Metodologia Fuzzy-FMEA

Indique o nome do ficheiro a carregar: 'CS.mat'

Indique o nome do ficheiro dos pesos do júri a carregar: 'J.mat'

4 A priorização dos potenciais modos de falha pela metodologia Fuzzy-FMEA:

5	Modo_falha	Coef_proximidade
6	_____	_____
7		
8	1	0.12219
9	2	0.11699
10	3	0.10609
11	4	0.074232
12	5	0.14334
13	6	0.095545
14	7	0.08476
15	8	0.08476
16	9	0.12219
17	10	0.08476
18	11	0.0953
19	12	0.097915
20	13	0.15213
21	14	0.16067
22	15	0.12219
23	16	0.14967
24	17	0.08476
25	18	0.16273
26	19	0.0953
27	20	0.16067
28	21	0.1979
29	22	0.14975
30	23	0.14974
31	24	0.12787
32	25	0.18989
33	26	0.10609
34	27	0.13904
35	28	0.16073
36	29	0.11903
37	30	0.18271
38	31	0.16097
39	32	0.11903
40	33	0.11927
41	34	0.10847
42	35	0.16273
43	36	0.13871
44	37	0.13276
45	38	0.11699
46	39	0.11903
47	40	0.12984
48	41	0.11692
49	42	0.14974
50	43	0.12805
51	44	0.14975
52	45	0.12984
53	46	0.14975
54	47	0.12805
55	48	0.16073

56	49	0.14983
57	50	0.17168
58	51	0.084485
59	52	0.14974
60	53	0.13871
61	54	0.12782
62	55	0.17606
63	56	0.15172
64	57	0.18449
65	58	0.14967
66	59	0.14971
67	60	0.11708
68	61	0.12795
69	62	0.14076
70	63	0.16069
71	64	0.18264
72	65	0.14974
73	66	0.10614
74	67	0.16779
75	68	0.14662
76	69	0.12219
77	70	0.11241
78	71	0.1789
79	72	0.20085
80	73	0.20085
81	74	0.22288
82	75	0.13894
83	76	0.0953
84	77	0.12805
85	78	0.17645
86	79	0.20648
87	80	0.21751
88	81	0.14995
89	82	0.17375
90	83	0.17168
91	84	0.16069
92	85	0.17167
93	86	0.16077
94	87	0.13894
95	88	0.17348
96	89	0.18449
97	90	0.14974
98	91	0.13276
99	92	0.14076
100	93	0.16255
101	94	0.1278
102	95	0.10644
103	96	0.11903
104	97	0.1175
105	98	0.10644
106	99	0.08476
107	100	0.14662
108	101	0.17348
109	102	0.13871

110	103	0.12984
111	104	0.12984
112	105	0.11699
113	106	0.096688
114	107	0.096688
115	108	0.10609
116	109	0.19368
117	110	0.23006
118		
119	Fim da análise	

Anexo XIV

Exposição dos resultados obtidos do ensaio 4 [*Matlab*]

MATLAB Command Window

```
>> AHP_COMPLEMENTAR
```

```
Introduza o nº total de critérios: 5
```

```
Introduza a importância do critério 1 face ao critério 2:1/3
```

```
Introduza a importância do critério 1 face ao critério 3:4
```

```
Introduza a importância do critério 1 face ao critério 4:6
```

```
Introduza a importância do critério 1 face ao critério 5:1/3
```

```
Introduza a importância do critério 2 face ao critério 3:7
```

```
Introduza a importância do critério 2 face ao critério 4:7
```

```
Introduza a importância do critério 2 face ao critério 5:3
```

```
Introduza a importância do critério 3 face ao critério 4:2
```

```
Introduza a importância do critério 3 face ao critério 5:0.5
```

```
Introduza a importância do critério 4 face ao critério 5:0.25
```

```
Matriz de comparação par-a-par-c ritérios:
```

1.0000	0.3333	4.0000	6.0000	0.3333
3.0000	1.0000	7.0000	7.0000	3.0000
0.2500	0.1429	1.0000	2.0000	0.5000
0.1667	0.1429	0.5000	1.0000	0.2500
3.0000	0.3333	2.0000	4.0000	1.0000

```
Somatório de cada coluna da matriz de comparação par-a-par:
```

7.4167	1.9524	14.5000	20.0000	5.0833
--------	--------	---------	---------	--------

```
Matriz de comparação par-a-par normalizada-critérios:
```

0.1348	0.1707	0.2759	0.3000	0.0656
0.4045	0.5122	0.4828	0.3500	0.5902
0.0337	0.0732	0.0690	0.1000	0.0984
0.0225	0.0732	0.0345	0.0500	0.0492
0.4045	0.1707	0.1379	0.2000	0.1967

```
O peso do critério 1 é: 0.1894. O
```

```
peso do critério 2 é: 0.46792.
```

```
O peso do critério 3 é: 0.074841.
```

```
O peso do critério 4 é: 0.045861.
```

```
O peso do critério 5 é: 0.22198.
```

```
'As comparações par-a-par são consistentes.'
```

Atributo

Lambda max.	[5.3720]
I.C	[0.0930]
R.C	[0.0830]
Consistência	'As comparações par-a-par são consistentes.'	

```
Indique o número de alternativas: 3
```

```
Introduza a importância do alternativa 1 face ao alternativa 2 do critério 1 : 1/3
```

```
Introduza a importância do alternativa 1 face ao alternativa 3 do critério 1 : 0.5
```

```
Introduza a importância do alternativa 2 face ao alternativa 3 do critério 1 : 2
```

```
Matriz de comparaçã par-a-par-alternativas do critério 1
```

1.0000	0.3333	0.5000
3.0000	1.0000	2.0000
2.0000	0.5000	1.0000

```
Somatório de cada coluna da matriz de comparação par-a-par-alternativas do critério 1
```

MATLAB Command Window

6.0000 1.8333 3.5000

MATLAB Command Window

Matriz de comparação par-a-par normalizada-alternativas do critério 1

```
0.1667    0.1818    0.1429
0.5000    0.5455    0.5714
0.3333    0.2727    0.2857
```

O vetor de prioridades das alternativas do critério 1 é:

```
0.1638
0.5390
0.2973
```

'As comparações par-a-par são consistentes.'

Atributo

```
Lambda max.    [          3.0092]
I.C            [          0.0046]
R.C            [          0.0079]
Consistência   'As comparações par-a-par são consistentes.'
```

Introduza a importância do alternativa 1 face ao alternativa 2 do critério 2 : 3

Introduza a importância do alternativa 1 face ao alternativa 3 do critério 2 : 2

Introduza a importância do alternativa 2 face ao alternativa 3 do critério 2 : 1/3

Matriz de comparação par-a-par-alternativas do critério 2

```
1.0000    3.0000    2.0000
0.3333    1.0000    0.3333
0.5000    3.0000    1.0000
```

Somatório de cada coluna da matriz de comparação par-a-par-alternativas do critério 2

```
1.8333    7.0000    3.3333
```

Matriz de comparação par-a-par normalizada-alternativas do critério 2

```
0.5455    0.4286    0.6000
0.1818    0.1429    0.1000
0.2727    0.4286    0.3000
```

O vetor de prioridades das alternativas do critério 2 é:

```
0.5247
0.1416
0.3338
```

'As comparações par-a-par são consistentes.'

Atributo

```
Lambda max.    [          3.0538]
I.C            [          0.0269]
R.C            [          0.0464]
Consistência   'As comparações par-a-par são consistentes.'
```

Introduza a importância do alternativa 1 face ao alternativa 2 do critério 3 : 1/2

Introduza a importância do alternativa 1 face ao alternativa 3 do critério 3 : 1/5

Introduza a importância do alternativa 2 face ao alternativa 3 do critério 3 : 1/4

MATLAB Command Window

Matriz de comparação par-a-par-alternativas do critério 3

1.0000	0.5000	0.2000
2.0000	1.0000	0.2500
5.0000	4.0000	1.0000

Somatório de cada coluna da matriz de comparação par-a-par-alternativas do critério 3

8.0000	5.5000	1.4500
--------	--------	--------

Matriz de comparação par-a-par normalizada-alternativas do critério 3

0.1250	0.0909	0.1379
0.2500	0.1818	0.1724
0.6250	0.7273	0.6897

O vetor de prioridades das alternativas do critério 3 é:

0.1179
0.2014
0.6806

'As comparações par-a-par são consistentes.'

Atributo

Lambda max.	[3.0247]
I.C	[0.0124]
R.C	[0.0213]
Consistência	'As comparações par-a-par são consistentes.'	

Introduza a importância do alternativa 1 face ao alternativa 2 do critério 4 : 3

Introduza a importância do alternativa 1 face ao alternativa 3 do critério 4 : 2

Introduza a importância do alternativa 2 face ao alternativa 3 do critério 4 : 1/4

Matriz de comparação par-a-par-alternativas do critério 4

1.0000	3.0000	2.0000
0.3333	1.0000	0.2500
0.5000	4.0000	1.0000

Somatório de cada coluna da matriz de comparação par-a-par-alternativas do critério 4

1.8333	8.0000	3.2500
--------	--------	--------

Matriz de comparação par-a-par normalizada-alternativas do critério 4

0.5455	0.3750	0.6154
0.1818	0.1250	0.0769
0.2727	0.5000	0.3077

O vetor de prioridades das alternativas do critério 4 é:

0.5119
0.1279
0.3601

'As comparações par-a-par são consistentes.'

Atributo

Lambda max.	[3.1087]
-------------	---	---------

MATLAB Command Window

```
I.C          [          0.0543]
R.C          [          0.0937]
Consistência 'As comparações par-a-par são consistentes.'
```

Introduza a importância do alternativa 1 face ao alternativa 2 do critério 5 : 4

Introduza a importância do alternativa 1 face ao alternativa 3 do critério 5 : 3

Introduza a importância do alternativa 2 face ao alternativa 3 do critério 5 : 2

Matriz de comparação par-a-par-alternativas do critério 5

```
o
1.0000    4.0000    3.0000
0.2500    1.0000    2.0000
0.3333    0.5000    1.0000
```

Somatório de cada coluna da matriz de comparação par-a-par-alternativas do critério 5

```
1.5833    5.5000    6.0000
```

Matriz de comparação par-a-par normalizada-alternativas do critério 5

```
0.6316    0.7273    0.5000
0.1579    0.1818    0.3333
0.2105    0.0909    0.1667
```

O vetor de prioridades das alternativas do critério 5 é:

```
0.6196
0.2243
0.1560
```

'As comparações par-a-par são consistentes.'

Atributo

```
Lambda max. [          3.1093]
I.C          [          0.0546]
R.C          [          0.0942]
Consistência 'As comparações par-a-par são consistentes.'
```

O vetor com os pesos finais de cada alternativa é:

```
0.4464
0.2391
0.3146
```

Indique o nome do ficheiro a guardar: 'CRITERIOS_AHP_FMEA.mat'

Fim de estudo

>>

MATLAB Command Window

```
1 Introduza o nº total de critérios: 4
2 Introduza a importância do critério 1 face ao critério 2:1/5
3 Introduza a importância do critério 1 face ao critério 3:1/2
4 Introduza a importância do critério 1 face ao critério 4:1/2
5 Introduza a importância do critério 2 face ao critério 3:2
6 Introduza a importância do critério 2 face ao critério 4:4
7 Introduza a importância do critério 3 face ao critério 4:1/2
8 Matriz de comparação par-a-par- ritérios:
9     1.0000  0.2000  0.5000  0.5000
10    5.0000  1.0000  2.0000  4.0000
11    2.0000  0.5000  1.0000  0.5000
12    2.0000  0.2500  2.0000  1.0000
13
14 Somatório de cada coluna da matriz de comparação par-a-par:
15    10.0000  1.9500  5.5000  6.0000
16
17 Matriz de comparação par-a-par normalizada-critérios:
18    0.1000  0.1026  0.0909  0.0833
19    0.5000  0.5128  0.3636  0.6667
20    0.2000  0.2564  0.1818  0.0833
21    0.2000  0.1282  0.3636  0.1667
22
23 O peso do critério 1 é: 0.094202.
24 O peso do critério 2 é: 0.51078.
25 O peso do critério 3 é: 0.18039.
26 O peso do critério 4 é: 0.21463.
27 'As comparações par-a-par são consistentes.' 28
29
30
31
32 Lambda max.  [ 4.1748]
33 I.C          [ 0.0583]
34 R.C          [ 0.0647]
35 Consistência 'As comparações par-a-par são consistentes.'
36
37 Indique o número de elementos que compõe o júri 2
38 Introduza a importância do júri 1 face ao critério 1:4
39 Introduza a importância do júri 1 face ao critério 2:2
40 Introduza a importância do júri 1 face ao critério 3:5
41 Introduza a importância do júri 1 face ao critério 4:3
42 Introduza a importância do júri 2 face ao critério 1:3
43 Introduza a importância do júri 2 face ao critério 2:3
44 Introduza a importância do júri 2 face ao critério 3:2
45 Introduza a importância do júri 2 face ao critério 4:3
46 A matriz de decisão-TOPSIS é:
47     4     2     5     3
48     3     3     2     3
49
50 A matriz de decisão normalizada-TOPSIS é:
51     0.4438  0.2219  0.5547  0.3328
52     0.3328  0.3328  0.2219  0.3328
53
54 A matriz de decisão ponderada normalizada-TOPSIS é:
55     0.0418  0.1133  0.1001  0.0714
```

MATLAB Command Window

```
56      0.0314      0.1700      0.0400      0.0714
57
58 Di* :
59      0.0567
60      0.0609
61
62 Di- :
63      0.0609
64      0.0567
65
66 O peso do elemento de júri 1 na avaliação é de:0.51817
67 O peso do elemento de júri 2 na avaliação é de:0.48183
68 Indique o nome do ficheiro a guardar: 'J.mat'
69 Fim da análise
```

MATLAB Command Window

```
1 Metodologia Fuzzy-FMEA
2 Indique o nome do ficheiro a carregar: 'CS.mat'
3 Indique o nome do ficheiro dos pesos do júri a carregar: 'J.mat'
4 Indique o nome do ficheiro dos pesos dos critérios a carregar: 'C.mat'
5 A priorização dos potenciais modos de falha pela metodologia Fuzzy-FMEA:
6     Modo_falha      Coef_proximidade
7     _____      _____
8
9         1           0.10787
10        2           0.1266
11        3           0.11199
12        4           0.073485
13        5           0.13198
14        6           0.10203
15        7           0.087586
16        8           0.087586
17        9           0.10787
18       10           0.087586
19       11           0.097536
20       12           0.090466
21       13           0.16306
22       14           0.17652
23       15           0.10787
24       16           0.15745
25       17           0.087586
26       18           0.17307
27       19           0.097536
28       20           0.17652
29       21           0.20076
30       22           0.16621
31       23           0.16865
32       24           0.14365
33       25           0.21569
34       26           0.10772
35       27           0.16289
36       28           0.18339
37       29           0.11455
38       30           0.20604
39       31           0.18551
40       32           0.11455
41       33           0.11061
42       34           0.10042
43       35           0.17307
44       36           0.1471
45       37           0.11783
46       38           0.1266
47       39           0.11455
48       40           0.12475
49       41           0.12898
50       42           0.16865
51       43           0.14816
52       44           0.16621
53       45           0.12475
54       46           0.16621
55       47           0.14816
```

MATLAB Command Window

56	48	0.18339
57	49	0.17309
58	50	0.19127
59	51	0.089772
60	52	0.16865
61	53	0.1471
62	54	0.13927
63	55	0.16285
64	56	0.1454
65	57	0.19361
66	58	0.15745
67	59	0.16428
68	60	0.12055
69	61	0.12836
70	62	0.13505
71	63	0.17465
72	64	0.19726
73	65	0.15998
74	66	0.1188
75	67	0.14952
76	68	0.12538
77	69	0.10787
78	70	0.098664
79	71	0.18752
80	72	0.21694
81	73	0.21694
82	74	0.24645
83	75	0.156
84	76	0.097536
85	77	0.14816
86	78	0.15904
87	79	0.21437
88	80	0.22478
89	81	0.14912
90	82	0.16618
91	83	0.17823
92	84	0.17465
93	85	0.18937
94	86	0.16361
95	87	0.13873
96	88	0.17453
97	89	0.19361
98	90	0.16865
99	91	0.11783
100	92	0.13505
101	93	0.16856
102	94	0.1368
103	95	0.10388
104	96	0.11455
105	97	0.13818
106	98	0.11663
107	99	0.087586
108	100	0.12538
109	101	0.17887
110	102	0.1471

MATLAB Command Window

```
111         103         0.12475
112         104         0.12475
113         105         0.11801
114         106         0.090833
115         107         0.090833
116         108         0.11199
117         109         0.21016
118         110         0.25611
119
120 Fim da análise
121 >>
```

Anexo XV

Quadro síntese dos resultados da metodologia *Fuzzy-FMEA*

Nº Pot. Modo de Falha	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4	
	Cc-FUZZY FMEA	Ranking - 1	Cc-FUZZY FMEA	Ranking - 2	Cc-FUZZY FMEA	Ranking - 3	Cc-FUZZY FMEA	Ranking-4
1	0,122	75	0,108	86	0,122	74	0,108	89
2	0,106	93	0,114	80	0,117	85	0,127	68
3	0,101	96	0,107	87	0,106	94	0,112	86
4	0,074	110	0,073	110	0,074	110	0,073	110
5	0,133	63	0,120	71	0,143	52	0,132	65
6	0,096	99	0,102	93	0,096	100	0,102	95
7	0,079	105	0,080	105	0,085	104	0,088	105
8	0,079	106	0,080	106	0,085	105	0,088	106
9	0,117	80	0,101	94	0,122	75	0,108	90
10	0,079	107	0,080	107	0,085	106	0,088	107
11	0,085	103	0,085	104	0,095	101	0,098	98
12	0,098	98	0,090	99	0,098	97	0,090	103
13	0,147	40	0,156	44	0,152	35	0,163	41
14	0,150	38	0,164	32	0,161	33	0,177	22
15	0,117	81	0,101	95	0,122	76	0,108	91
16	0,144	47	0,154	46	0,150	48	0,157	46
17	0,079	108	0,080	108	0,085	107	0,088	108
18	0,152	33	0,161	34	0,163	24	0,173	28
19	0,095	100	0,095	97	0,095	102	0,098	99
20	0,150	39	0,164	33	0,161	34	0,177	23
21	0,192	9	0,193	12	0,198	7	0,201	10
22	0,144	44	0,159	37	0,150	39	0,166	35
23	0,139	51	0,156	40	0,150	42	0,169	30
24	0,128	66	0,144	55	0,128	71	0,144	58
25	0,184	10	0,211	8	0,190	9	0,216	6
26	0,111	88	0,115	79	0,106	95	0,108	93
27	0,144	43	0,168	30	0,139	55	0,163	42
28	0,155	28	0,178	19	0,161	29	0,183	18
29	0,108	90	0,102	91	0,119	79	0,115	82
30	0,172	14	0,193	11	0,183	12	0,206	9
31	0,161	25	0,183	16	0,161	27	0,186	17
32	0,108	91	0,102	92	0,119	80	0,115	83
33	0,114	84	0,104	90	0,119	78	0,111	88
34	0,098	97	0,089	100	0,108	90	0,100	96
35	0,152	34	0,161	35	0,163	25	0,173	29
36	0,139	57	0,149	50	0,139	58	0,147	54
37	0,122	73	0,106	88	0,133	61	0,118	79
38	0,117	78	0,129	67	0,117	86	0,127	69
39	0,119	76	0,117	76	0,119	81	0,115	84
40	0,125	69	0,118	73	0,130	63	0,125	72
41	0,122	72	0,136	60	0,117	88	0,129	66
42	0,139	52	0,156	41	0,150	43	0,169	31
43	0,128	64	0,146	53	0,128	67	0,148	51
44	0,144	45	0,159	38	0,150	40	0,166	36
45	0,125	70	0,118	74	0,130	64	0,125	73
46	0,155	30	0,174	24	0,150	41	0,166	37
47	0,128	65	0,146	54	0,128	68	0,148	52
48	0,155	29	0,178	20	0,161	30	0,183	19
49	0,150	35	0,173	25	0,150	38	0,173	27
50	0,166	22	0,186	14	0,172	20	0,191	14
51	0,085	104	0,088	101	0,084	109	0,090	104
52	0,139	53	0,156	42	0,150	44	0,169	32
53	0,139	58	0,149	51	0,139	59	0,147	55
54	0,117	83	0,127	68	0,128	72	0,139	59
55	0,171	17	0,156	45	0,176	16	0,163	43
56	0,146	41	0,138	57	0,152	36	0,145	57
57	0,195	8	0,206	9	0,184	10	0,194	12
58	0,144	46	0,150	49	0,150	49	0,157	47
59	0,150	37	0,164	31	0,150	47	0,164	39
60	0,112	86	0,113	82	0,117	84	0,121	76
61	0,123	71	0,121	70	0,128	70	0,128	67
62	0,141	49	0,133	62	0,141	53	0,135	63
63	0,155	31	0,169	27	0,161	31	0,175	24
64	0,172	16	0,185	15	0,183	13	0,197	11
65	0,139	54	0,147	52	0,150	45	0,160	44
66	0,139	56	0,152	48	0,106	93	0,119	77
67	0,157	27	0,137	58	0,168	23	0,150	49
68	0,136	59	0,114	81	0,147	50	0,125	70
69	0,117	82	0,101	96	0,122	77	0,108	92
70	0,107	92	0,092	98	0,112	89	0,099	97

Nº Pot. Modo de Falha	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4	
	Cc-FUZZY FMEA	Ranking - 1	Cc-FUZZY FMEA	Ranking - 2	Cc-FUZZY FMEA	Ranking - 3	Cc-FUZZY FMEA	Ranking-4
71	0,184	11	0,195	10	0,179	14	0,188	16
72	0,206	5	0,224	3	0,201	5	0,217	4
73	0,206	6	0,224	4	0,201	6	0,217	5
74	0,217	2	0,239	2	0,223	2	0,246	2
75	0,170	18	0,183	17	0,139	56	0,156	48
76	0,126	68	0,124	69	0,095	103	0,098	100
77	0,159	26	0,175	22	0,128	69	0,148	53
78	0,177	12	0,157	39	0,176	15	0,159	45
79	0,206	4	0,212	7	0,206	4	0,214	7
80	0,212	3	0,217	6	0,218	3	0,225	3
81	0,145	42	0,142	56	0,150	37	0,149	50
82	0,168	19	0,159	36	0,174	17	0,166	38
83	0,166	23	0,175	21	0,172	21	0,178	21
84	0,155	32	0,169	28	0,161	32	0,175	25
85	0,172	15	0,192	13	0,172	22	0,189	15
86	0,150	36	0,153	47	0,161	28	0,164	40
87	0,117	79	0,116	78	0,139	57	0,139	60
88	0,168	21	0,172	26	0,173	18	0,175	26
89	0,174	13	0,181	18	0,184	11	0,194	13
90	0,139	55	0,156	43	0,150	46	0,169	33
91	0,133	62	0,116	77	0,133	62	0,118	80
92	0,141	50	0,137	59	0,141	54	0,135	64
93	0,163	24	0,169	29	0,163	26	0,169	34
94	0,122	74	0,129	66	0,128	73	0,137	62
95	0,112	87	0,113	83	0,106	91	0,104	94
96	0,119	77	0,113	84	0,119	82	0,115	85
97	0,112	85	0,131	65	0,118	83	0,138	61
98	0,101	95	0,109	85	0,106	92	0,117	81
99	0,079	109	0,080	109	0,085	108	0,088	109
100	0,142	48	0,119	72	0,147	51	0,125	71
101	0,168	20	0,174	23	0,173	19	0,179	20
102	0,128	67	0,135	61	0,139	60	0,147	56
103	0,135	60	0,132	63	0,130	65	0,125	74
104	0,135	61	0,132	64	0,130	66	0,125	75
105	0,106	94	0,106	89	0,117	87	0,118	78
106	0,091	101	0,086	102	0,097	98	0,091	101
107	0,091	102	0,086	103	0,097	99	0,091	102
108	0,111	89	0,117	75	0,106	96	0,112	87
109	0,203	7	0,221	5	0,194	8	0,210	8
110	0,230	1	0,256	1	0,230	1	0,256	1