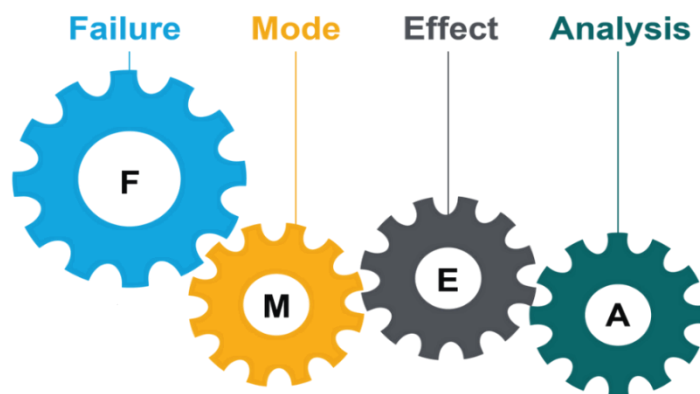


INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Mecânica



Melhoria da priorização dos modos de falha no FMEA

André Filipe Coelho Miguel
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

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

Orientador: Doutor Vítor Manuel Rodrigues Anes

Júri:

Presidente: Doutor André Rui Dantas Carvalho

Vogais:

Doutor Vítor Manuel Rodrigues Anes

Doutor Duarte Nuno Caldeira Cordeiro Dinis

Dezembro de 2023



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Mecânica

Melhoria da priorização dos modos de falha no FMEA

André Filipe Coelho Miguel
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

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

Orientador: Doutor Vítor Manuel Rodrigues Anes

Júri:

Presidente: Doutor André Rui Dantas Carvalho

Vogais:

Doutor Vítor Manuel Rodrigues Anes
Doutor Duarte Nuno Caldeira Cordeiro Dinis

Dezembro de 2023

Agradecimentos

Dedico esta tese a todos os meus amigos e familiares que sempre me apoiaram nesta etapa da minha vida e sempre quiseram o melhor para mim. Não esquecendo o meu orientador Doutor Vítor Anes que me foi orientado com reuniões regulares.

Resumo

Atualmente, a indústria depende muito da manutenção e por isso o cuidado que têm em conseguir fazer uma melhor gestão e controlo dos seus ativos é de extrema importância. Para conseguir minimizar a frequência da manutenção nos equipamentos, sistemas ou mesmo em serviços, as empresas acabam por investir na fase inicial do projeto antes mesmo do produto existir, o que possibilita a otimização dos seus produtos tornando conseguindo obter uma maior fiabilidade. Na análise inicial do projeto quanto na fase em que um processo ou equipamento já esteja em funcionamento, é possível fazer uma análise de modo a conseguir ter um controlo maior da situação o que permite ter um maior controlo da manutenção e por isso um controlo do seu orçamento. Para fazer a análise, são necessárias técnicas como é o caso da Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA) algo que já é amplamente usado na indústria, já que é uma ferramenta que ajuda a descobrir modos de falha e a conseguir priorizá-los. Este método, apesar de tudo, apresenta inúmeras limitações, desde o facto de que dentro de uma mesma equipa haver diferente opiniões, até na própria fórmula do *Risk Priority Number*, o que pode causar uma análise que não seja a mais correta. Neste trabalho, é proposto fazer uma melhoria do *Risk Priority Number*, criando um método que consiga ser capaz de superar as limitações que este apresenta, e para isso usar diferentes ferramentas como é o caso do *fuzzy logic*.

Palavras-Chave: FMEA; Análise de risco; Modos de falha; Fuzzy Logic; Número Prioritário de Risco

Abstract

Currently, the industry depends heavily on maintenance and therefore the care we take in being able to better manage and control its assets is extremely important. In order to minimize the frequency of maintenance on equipment, systems or even services, companies end up investing in the initial phase of the project before the product even exists, which makes it possible to optimize their products by achieving greater reliability. In the initial analysis of the project, or in the phase in which a process or piece of equipment is already in operation, it is possible to carry out an analysis in order to have greater control of the situation, which allows for greater control of maintenance and therefore control of its budget. In order to carry out the analysis, techniques are needed, such as Failure Modes and Effects Analysis (FMEA), something that is already widely used in industry, as it is a tool that helps to discover failure modes and prioritize them. However, this method has numerous limitations, from the fact that there are different opinions within the same team, to the Risk Priority Number formula itself, which can lead to an analysis that is not the most correct. This paper proposes an improvement to the Risk Priority Number, creating a method that is able to overcome its limitations, using different tools such as fuzzy logic.

Keywords: FMEA; Risk analysis; Failure modes; Fuzzy Logic; Risk Priority Number

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Índice	xi
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xv
Lista de Siglas e Acrónimos	xvii
1 Introdução	1
1.1 Motivação e Contextualização da Dissertação	1
1.2 Objetivos e Metodologias	2
1.2.1 Perguntas de investigação.....	2
1.3 Organização da Dissertação.....	3
2 Revisão da literatura	5
2.1 Manutenção e Fiabilidade	5
2.2 Análise de riscos	8
2.2.1 Tipos e Técnicas de análise de risco.....	12
2.3 Análise de modo e efeito de falha (FMEA).....	14
2.3.1 RPN	18
2.3.2 Limitações do RPN.....	21
2.4 Fuzzy Logic – teoria dos conjuntos fuzzy	24
2.4.1 Mamdani.....	28
3 Metodologia-Alteração da função RPN	33
3.1 Método 1	33
3.2 Método 2.....	47
3.2.1 Primeiro sistema fuzzy	47
3.2.2 Segundo sistema <i>fuzzy logic</i>	56
4 Validação dos modelos propostos	63
5 Conclusão	67
5.1 Trabalhos Futuros	68
Referências	69
Anexos	75

Índice de Figuras

Figura 1 - Curva da banheira	6
Figura 2- Exemplo de uma árvore de falhas - queda do telhado	9
Figura 3 - Guia Prático ISO 31000:2018 - Risk management.....	11
Figura 4 - Variáveis do cálculo do RPN e sua forma de obtenção	16
Figura 5-Etapas do processo do FMEA.....	17
Figura 6-Processo geral do cálculo e análise do RPN	20
Figura 7 - Visualização do RPN para diferentes áreas e modos de falha.....	21
Figura 8 - Comparação da avaliação dos riscos de severidade	22
Figura 9-Comparação da avaliação dos riscos de ocorrência.....	22
Figura 10-Comparação da avaliação dos riscos de detetabilidade	23
Figura 11- FIS método de Mamdani e posterior "desfuzificação" em relação ao serviço, comida e gorjeta	29
Figura 12 - Exemplo do desenvolvimento de uma regra pelo Mamdani.....	30
Figura 13 -- Exemplo geral de uma aplicação Mamdani com 49 regras.....	30
Figura 14 -Variáveis input e output no <i>fuzzy logic</i> método 1	41
Figura 15 - Input da severidade método 1	42
Figura 16 - Input Ocorrência método 1	42
Figura 17 - Input Detetabilidade método 1.....	42
Figura 18 - Output RPN método1	42
Figura 19- Introdução das regras no FIS no método 1	43
Figura 20- a) Evolução do RPN em função da ocorrência e severidade b) Evolução do RPN em função da ocorrência e detetabilidade.....	44
Figura 21- Simulação do método 1 do fuzzy em simulink.....	44
Figura 22 - Variação dos valores do RPN - Método 1	47
Figura 23 - Introdução das variáveis output e input no método 2.....	53
Figura 24 - Variável input ocorrência método 2.....	54
Figura 25 – Variável input detetabilidade método 2	54
Figura 26 - Variável output produto OxD	54
Figura 27 – Introdução das regras FIS do método 2 para obtenção variável OxD.....	55
Figura 28 - Simulação do primeiro sistema <i>fuzzy</i> do método 2 em <i>simulink</i>	56
Figura 29 - Introdução das variáveis inputs S e OxD e output RPN.....	56

Figura 30 - Introdução das regras FIS do método 2 para obtenção do valor RPN.....	59
Figura 31 - Variável input severidade	59
Figura 32 - Variável input OxD.....	60
Figura 33 - Valor output RPN método 2	60
Figura 34 - Método 2 adaptado em Simulink	61

Índice de Tabelas

Tabela 1- Distinções entre tipos e técnicas de análise de risco	13
Tabela 2-Escala valor RPN e o seu nível de risco	18
Tabela 3-Critério linguístico para um acidente de carro	19
Tabela 4-Rating de escala para a severidade, ocorrência e detetabilidade de uma resposta rápida do sistema de hospital.....	24
Tabela 5- Valores linguísticos da severidade	34
Tabela 6- Valores linguísticos para a Ocorrência.....	34
Tabela 7- Valores linguísticos para a Detetabilidade	35
Tabela 8 - Valores linguístico do RPN.....	36
Tabela 9- Exemplo da multiplicação realizadas para posterior obtenção da variável linguística	38
Tabela 10- Combinação das variáveis linguística severidade com as do RPN	39
Tabela 11 - Verificação de não duplicação do RPN no método 1.....	45
Tabela 12 - Verificação da duplicação do RPN no método 1	45
Tabela 13 - Verificação da maior importância da severidade no método 1	45
Tabela 14 - Variação dos valores da severidade no método 1.....	46
Tabela 15 - Variação dos valores da detetabilidade no método 1	46
Tabela 16 - Valores linguísticos da ocorrência para o método 2.....	48
Tabela 17 - Variáveis linguísticas para o produto OxD	49
Tabela 18- Exemplo dos valores multiplicados no conjunto do primeiro fuzzy no método 2.....	50
Tabela 19 - Combinação das variáveis linguística severidade com as do Produto OxD	51
Tabela 20 - Variáveis Linguísticas da severidade para o método 2	57
Tabela 21 - Exemplo de multiplicação entre as variáveis S e OxD	58
Tabela 22 – Exemplos da aplicação prática do método 2.....	61
Tabela 23 - Comparação do Método1 e 2 com o primeiro caso de estudo.....	63
Tabela 24 – Valores do RPN tradicional, Método 1 e 2 no segundo caso de estudo.	64
Tabela 25 - Ordenação dos modos de falha por ordem decrescente	65

Lista de Siglas e Acrónimos

FMEA - *Failure Modes and Effects Analysis*

AAF – Análise árvore de falhas;

Hazop – Estudo de risco e operabilidade

S- Severidade

O- Ocorrência

D- Detetabilidade

RPN- *Risk Priority Number*

SGA- Gaseificação de água supercrítica

FIS- *Fuzzy inference system*

RCM- *Reliability centered maintenance*

1 Introdução

1.1 Motivação e Contextualização da Dissertação

O tema em estudo neste trabalho abrange diferentes áreas a nível profissional, pois pode tanto ser usado nas diferentes áreas de engenharia como ser usado na área de saúde o que permite ter um conhecimento mais vasto. O FMEA é um método que pode ser aplicado em diferentes áreas, e, portanto, é de grande interesse a nível mundial pelo que é possível encontrar diversos artigos e casos de estudo que permitem obter um maior conhecimento de diversas perspetivas. Os processos de manutenção têm uma grande participação no custo total ao longo do ciclo de vida dos equipamentos industriais. A energia e a manutenção são normalmente os principais impulsionadores de custos ao longo do ciclo de vida de um produto industrial. Portanto, é uma tarefa importante para as empresas durante a fase do projeto e produção conseguirem minimizar os custos de manutenção para que se possa obter uma otimização dos processos relacionados, como o fornecimento de peças sobressalentes. Junto a esta perspetiva económica, os processos de manutenção também têm impacto nas variáveis ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto ou equipamento [1]. A importância da manutenção é um ponto essencial para uma empresa, pois pode afetar muito o desempenho da mesma fazendo com que o lucro no final acabe por não ser tão positivo quanto se esperava, porque em muitos casos o pensamento ainda é que a manutenção é uma atividade de prejuízo pelo que sempre que possível deve ser evitada. Este tipo de empresas acaba por realizar na maior parte do tempo uma manutenção corretiva, em que algum caso poderá levar a uma paragem maior do que numa manutenção preventiva, como é o caso de uma linha de montagem, pois esta está sujeita a atividades anteriores à mesma que ao parar poderá prejudicar o processo como um todo, fazendo com que haja uma maior perda dos seus lucros do que se tivessem realizado uma manutenção programada. É sempre importante fazer uma análise dos modos de falha que podem vir acontecer e decidir quais as ações que deverão ser tomadas, pois cada modo de falha poderá ter diversas consequências, e é importante fazer a sua mitigação antes que estas aconteçam. Essas ações podem ser divididas em três categorias: “eliminar modos de falha”, “aumentar a detetabilidade de falhas” e “minimizar perdas caso ocorra uma

falha” [1]. É aqui que entra as técnicas de modos de falhas pois permitem fazer análise de um sistema ou equipamento como é o caso do *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA) que apesar deste apresentar algumas limitações é ainda um dos métodos que mais auxilia na análise dos modos de falha.

1.2 Objetivos e Metodologias

1.2.1 Perguntas de investigação

A maioria das ferramentas utilizadas na avaliação e gestão de riscos baseia-se em dados quantitativos. Devido a esta característica, estes métodos são de difícil aplicação em casos onde há pouca ou nenhuma informação disponível, pois necessitam de acesso a *logs* de eventos para obter informações estocásticas, o que é difícil de obter nestes casos [2]. A alternativa para superar este problema é utilizar ferramentas qualitativas de avaliação de riscos que contam com a experiência de especialistas para avaliar cenários de risco e os correspondentes modos de falha. A avaliação e gestão de riscos é uma atividade que visa apoiar a tomada de decisão. A modelação de risco de cenários, baseada nas variáveis de risco e no seu risco agregado, permite a correlação dos impactos da decisão com a sua probabilidade. Correlações deste tipo são úteis na seleção das opções mais adequadas com base no paradigma do dono do risco [2].

O sucesso a longo prazo de uma organização depende de muitas coisas, desde a avaliação e atualização contínua da sua oferta até à otimização dos seus processos. Como se isto não bastasse, também precisam levar em conta o inesperado da gestão de riscos [3].

A primeira abordagem ao FMEA veio do Exército dos EUA na década de 1950, que desenvolveu este método, uma estrutura para investigar e mitigar problemas resultantes de mau funcionamento de sistemas militares [4]. O método tem vindo a ser amplamente usado pelas boas indicações que tem dado apesar das suas limitações. Estas limitações apesar de existirem, e muitas vezes de maneira evidente, acabam por se conseguir diminuir consoante o processo e as áreas que se estão a analisar. O cálculo do RPN (*Risk Priority Number*) é sem dúvida uma das maiores limitações devido à sua fórmula, as suas variáveis, ao peso que estas possuem, etc. Apesar disso é aqui que entra

a grande questão que é o facto se é ou não possível fazer uma melhoria de forma que esta se torne uma ferramenta ainda mais útil com maior precisão em ser usada.

1.3 Organização da Dissertação

Este trabalho tem como objetivo principal a análise do FMEA e posterior análise do RPN de forma a obter uma versão que consiga combater as suas fragilidades. Para este efeito, o trabalho foi dividido em 5 capítulos.

O primeiro capítulo é a introdução onde se irá apresentar os objetivos, motivações e a estrutura da dissertação, bem como dar uma pequena explicação do que será o trabalho.

O segundo capítulo é a revisão da literatura e tem como base dar a conhecer o porquê do uso da FMEA das suas limitações e vantagens bem como os métodos que podem ser usados para contrariar essas limitações, como por exemplo a sua subjetividade na avaliação das variáveis da função RPN, ou a não existência de um mecanismo para atribuir diferentes pesos às variáveis da função RPN. Para isso é introduzido o conceito de manutenção e fiabilidade onde o uso do FMEA pode ter um grande impacto. É abordado as análises de risco bem como tipos e técnicas de análise de risco dando como natural um maior foco ao FMEA e consequentemente ao RPN e as suas limitações. É ainda abordado o sistema *Fuzzy Logic* bem como o sistema de inferência Mamdani, pois é o meio usado para melhorar os aspetos do RPN.

O terceiro capítulo que corresponde à metodologia é onde se irá apresentar o método usado na resolução do caso de estudo.

O quarto capítulo tem como objetivo aplicar o que foi abordado no capítulo anterior para comparação dos dados bem como a sua aplicação com outros casos de diferentes autores.

O quinto capítulo será a conclusão e trabalhos futuros onde aborda de forma resumida os resultados obtidos anteriores bem como ideias para possíveis melhorias que não foram realizadas durante este trabalho.

2 Revisão da literatura

2.1 Manutenção e Fiabilidade

As indústrias são confrontadas atualmente com desafios em que o objetivo é reduzir os altos custos da manutenção, visto que possuem uma cota parte dos investimentos do orçamento de uma empresa. Estes desafios associados à manutenção, investimentos e operações dos sistemas industriais, muitas vezes estão associados a envelhecimentos e baixa fiabilidade de componentes e sistemas. Nesse sentido, a gestão da manutenção desempenha um papel importante na constituição de uma importante fonte de vantagem competitiva para as indústrias [5].

A estratégia de manutenção identifica que a máquina precisa de reparo, o método de manutenção correspondente, o grau do reparo e o intervalo da sua manutenção. Segundo a norma BS EN 13306, a estratégia de manutenção é o método de gestão utilizado de modo a atingir os objetivos da manutenção [6-7]. É da responsabilidade de qualquer gestão de manutenção definir a sua estratégia de manutenção de acordo com os seguintes objetivos principais [7]:

- Garantir a disponibilidade do item para funcionar conforme necessário, com custos ótimos;
- Considerar a segurança e quaisquer outros requisitos obrigatórios associados ao item;
- Considerar qualquer impacto sobre o meio ambiente;
- Garantir a durabilidade do item e/ou a qualidade do produto ou serviço fornecido, considerando os custos quando necessário

A manutenção centrada na fiabilidade (RCM) é um método de engenharia de sistemas usado para determinar as necessidades de manutenção e otimizar as estratégias de manutenção. O RCM foi projetado para usar estatísticas de fiabilidade para determinar estratégias de manutenção económicas e razoáveis de modo que seja possível fazer a restauração/manutenção de equipamentos/sistemas ao menor custo económico, uma vez

que o principal motivo de usar o RCM é mesmo evitar a manutenção o mais possível atuando só mesmo quando necessário o que evita paragens que podiam estar programadas como é no caso da manutenção preventiva [6].

A fiabilidade refere-se a uma série de atividades para garantir que a fiabilidade do produto final atenda às especificações de projeto durante o seu ciclo de vida. No entanto, a maioria das atividades de garantia de fiabilidade está concentrada na fase de projeto. A fiabilidade do produto acabado do processo de fabricação é muitas vezes difícil de atender aos requisitos do projeto porque pode existir uma falta de controlo durante o processo de fabricação [8].

Em geral, a fiabilidade de um produto continua a degradar-se após um longo período de funcionamento normal, devido a uma série de fatores adversos e incertos, a curva da banheira mostra exatamente esse declínio através das falhas ao longo do ciclo de vida de um produto como é demonstrado na figura 1 [8-9].

Geralmente, as características associadas à fiabilidade são consideradas como portadoras de qualidade. A característica de fiabilidade é geralmente considerada como elementos importantes da característica de qualidade [8]. De acordo com o *American Society for Quality* a fiabilidade pode ser classificada “como a qualidade é variável ao longo do tempo”. A fiabilidade e a qualidade não podem ser tratadas como identidades separadas pois estão conectadas ao longo de um ciclo de vida do produto [10].

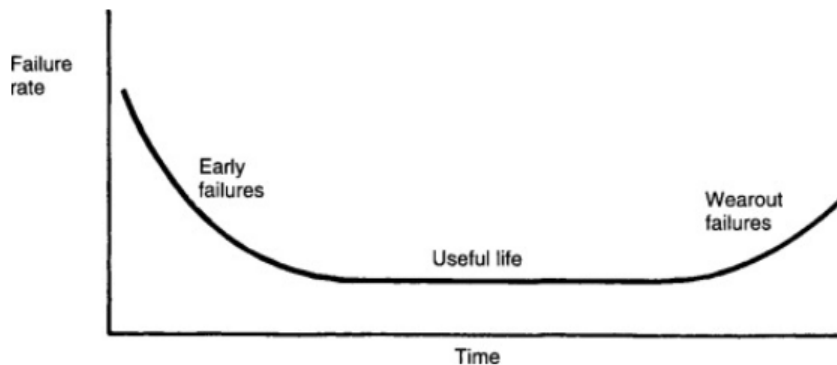


Figura 1 - Curva da banheira [9]

Felizmente, o desenvolvimento de novas tecnologia e informações veio criar cada vez mais ferramentas de apoio como os sensores inteligentes, plataformas de armazenamento de dados que fornecem maneiras de obter e gerir uma base de dados de qualidade operacional. Com a criação de uma base de dados é possível prever e analisar o estado operacional dos sistemas fabricados para a orientação de uma manutenção

preditiva, tornando-se o foco de pesquisa no campo da operação inteligente e manutenção [6].

Existe ainda a possibilidade de haver métodos de simulação que imitam os testes físicos e podem ser usados para encurtar os ciclos de desenvolvimento de produtos, aumentar a fiabilidade e reduzir os custos de desenvolvimento [11].

A estimativa da expectativa de vida do produto sob as condições de carga especificadas ajudará os fabricantes a determinar o período de garantia, cronograma de manutenção, substituição e assim por diante [11].

A análise da fiabilidade tradicional pode exigir um conjunto de valores com uma quantidade significativa de dados para precisão da modelagem probabilística das variáveis envolvidas. Conseguir grandes amostras pode ser uma tarefa desafiadora devido aos escassos recursos e custos humanos e aos danos adicionais nas estruturas induzidas por alguns métodos de avaliação. [12].

A maioria dos estudos considera apenas a otimização de estratégias de manutenção preventiva impulsionadas pelo desempenho ou a fiabilidade do equipamento com base em dados históricos de falhas. Os métodos de avaliação da fiabilidade baseados apenas nos dados de degradação do desempenho do equipamento ignoram as características operacionais do sistema de fabricação, e é difícil caracterizar com precisão o estado operacional do sistema de fabricação [6].

Os sistemas/equipamentos que possuem um maior nível de vida requerem especial atenção dos engenheiros no que diz respeito à avaliação da robustez e às estimativas de segurança para decisões de reparação e manutenção. A avaliação de segurança pode usar dados coletados de inspeções visuais de rotina e medições não destrutivas [13-16].

Com o aumento da pesquisa em análise da fiabilidade, os investigadores percebem que a fiabilidade do armazenamento e a fiabilidade do trabalho dos produtos são igualmente importantes. Em particular, produtos como airbags, produtos aeroespaciais, mísseis e outros produtos de utilização única estão armazenados durante a maior parte de sua vida útil [17-19].

Para sistemas com múltiplos componentes ou peças, surge a questão de tratar os componentes ou as peças isoladamente ou usar medidas ordenadas para lidar com o sistema como um todo. Além disso, definir o grau específico de manutenção das atividades executadas é de grande importância, pois tem influência direta no sucesso da atividade de manutenção em termos de custo e disponibilidade do equipamento [1]. Na

Europa foi estimado um montante de aproximadamente 150 mil milhões de euros de gasto anual em manutenção industrial. Ao mesmo tempo, há indicações de que cerca de um terço destes custos são desperdiçados devido a um mau planeamento, custos de horas extraordinárias, utilização inferior de manutenção preventiva e assim por diante. No entanto, a diversidade entre os diferentes tipos de indústria é substancial [20].

O impacto das atividades de manutenção na disponibilidade dos ativos é medido através do tempo mínimo de inatividade. Isso inclui tempos de inatividade programados e não programados relacionados à manutenção. O principal objetivo da manutenção preventiva é identificar falhas potenciais com tempo suficiente para planejar e programar o trabalho corretivo antes que a falha real ocorra. O principal objetivo da manutenção preventiva é identificar falhas potenciais com tempo suficiente para planejar e programar o trabalho corretivo antes que a falha real ocorra. As empresas de modo a reduzir os gastos que têm com a manutenção, podem usar diferentes estratégias para analisar os riscos, prever as falhas e assim reduzir as interrupções não planeadas e melhorar a fiabilidade dos sistemas/componentes [5]. As atividades para os modos de falha de alto risco devem ser desenvolvidas e recomendadas para melhorar o desempenho geral do sistema. Essas ações podem ser divididas em três categorias: “eliminar modos de falha”, “aumentar a detetabilidade de falhas” e “minimizar perdas caso ocorra uma falha” [1].

2.2 Análise de riscos

A segurança e fiabilidade têm sido reconhecidas como questões-chave para o desenvolvimento, comercialização e implementação de novas tecnologias, infraestruturas ou serviços. A engenharia da fiabilidade e a avaliação e análise de riscos desempenham um papel fundamental na abordagem proativa da segurança, pois antes os problemas aconteciam e só depois é que se realizava a análise para descobrir o porquê, enquanto que atualmente a ideia é atuar nos modos de falhas e perigos antes mesmo que esta ainda não tenha acontecido, para que seja possível evitar que venha acontecer [21].

A análise de risco é um processo crucial para a estratégia de segurança de uma empresa, tendo como principal objetivo, a eliminação de qualquer potencial de dano.

Quantificar riscos ajuda a medir melhor o impacto dos riscos nos projetos e a tomar melhores decisões na gestão de riscos [23].

A falta de uma análise de risco eficaz em grandes projetos como na construção de uma infraestrutura podem causar grandes falhas na sua execução, e é considerada parte essencial na detecção de desvios dos seus objetivos. É fundamental praticar a análise quantitativa dos riscos para realizar projetos de acordo com o calendário, o orçamento e a qualidade [24]. A abordagem à avaliação de risco deve estar disponível num plano de risco e implementado desde o início do projeto e dessa maneira permitir uma melhor compreensão dos riscos e os seus impactos nos objetivos [25].

Para o exército dos EUA, a gestão de risco é um “processo que consiste na identificação e análise dos perigos identificados, na determinação e controlo dos riscos associados aos perigos e na tomada de decisão em que os benefícios superam os custos” [26]. A gestão de riscos é uma abordagem científica para identificar, minimizar e antecipar as influências adversas nos projetos que muitas vezes podem ter um impacto significativo no orçamento de uma empresa [24], [27].

A análise de riscos é uma parte indispensável de um sistema de gestão, sendo uma ferramenta que ajuda a identificar potenciais perigos e a tomar as corretas medidas corretivas e preventivas. Existem muitas abordagens diferentes de avaliação de risco na literatura, como FMEA, Análise de Árvore de Falhas (AAF), Matriz L, Matriz X [28]. A análise de riscos desempenha um papel vital na redução dos riscos do projeto e na obtenção do desenvolvimento sustentável, podendo fornecer decisões adequadas quando se depara com escolhas entre diferentes ações [29]. A figura 2 mostra um exemplo de aplicação de uma AAF.

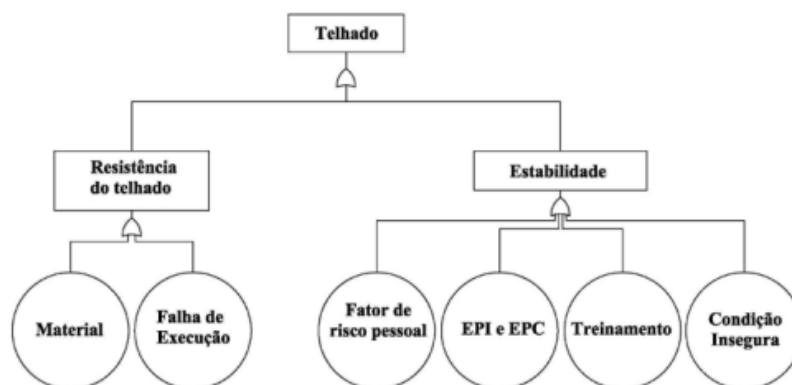


Figura 2- Exemplo de uma árvore de falhas - queda do telhado [30]

Como já mencionado existem diversos tipos de métodos de análise de risco, tendo todos diferentes objetivos. Por exemplo, se se souber que se teve uma perda e se quer saber as possíveis causas, utiliza-se a AAF. Um outro caso ocorre quando por exemplo se quer saber possíveis perdas, sendo aí aplicável o FMEA. Já no caso de se querer saber detalhes sobre o mau funcionamento de uma peça ou equipamento ou um processo o melhor será o uso de um estudo de riscos e operabilidade (HAZOP) [31]. Classificar ou priorizar riscos é uma maneira de ajudar a descobrir a gravidade do próprio risco para saber qual controlar primeiro. Geralmente, a prioridade é estabelecida levando em consideração a exposição do funcionário (aos perigos) e o potencial de incidentes, lesão ou doença. Ao atribuir uma prioridade aos riscos está se a criar uma classificação ou uma lista de ações [32].

Na literatura muitas das vezes o uso da palavra “perigo” é usado como “risco” o que pode por vezes gerar confusão. Por exemplo, um dicionário define “perigo” como “um perigo ou risco”, o que ajuda a explicar por que muitas pessoas usam os termos de forma intercambiável. Existem muitas definições para perigo, mas a definição mais comum é quando se fala em saúde e segurança no trabalho, é qualquer fonte de dano potencial ou efeitos adversos à saúde em algo ou alguém. Já o risco pode ser definido como a possibilidade que uma lesão, perda de propriedade ou dano ambiental ocorra quando se encontre a trabalhar com ou perto de um perigo. Basicamente, um perigo é o potencial de dano ou efeito adverso. Às vezes, o dano resultante é referido como o perigo em vez da fonte real do perigo. Por exemplo, a doença tuberculose pode ser chamada de “perigo” por alguns, mas, em geral, a bactéria causadora da tuberculose seria considerada o “perigo” ou “agente biológico perigoso” [31].

Não existe uma maneira simples ou única de determinar o nível de risco. A organização tem de escolher qual a melhor técnica para a sua situação. A análise dos riscos requer o conhecimento das atividades no local de trabalho, urgências das situações e o mais importante saber analisar o objetivo. Para situações em que não sejam complexas poderá ser feita uma avaliação a partir de um *brainstorming* baseado em conhecimento e experiência [32].

Os resultados obtidos podem ser convertidos em um índice de risco, através de uma matriz de risco, que podem ser facilmente compreendidos pelos engenheiros de campo e fornecer orientações úteis para os projetos e operações [33].

A avaliação quantitativa do risco é parte importante do processo pois permite a implementação segura de muitos sistemas de engenharia, incluindo por exemplo

estações de abastecimento e de armazenamento de hidrogénio, pois em caso de falha podem causar danos de propriedade, ferimentos, perdas de vidas e inatividade do próprio sistema. No entanto, os estudos de uma avaliação quantitativa de riscos exigem dados para garantir a segurança, a fiabilidade do sistema e prevenir perdas, manter a perceção pública da fiabilidade e segurança dos sistemas [20] [21].

A norma associada à gestão de risco é a ISO 31000. A utilização da ISO 31000 pode ajudar as organizações a aumentar a probabilidade de atingir os seus objetivos, melhorar a identificação de oportunidades e ameaças e alocar e utilizar eficazmente os recursos para o tratamento de riscos. Além de abordar a continuidade operacional, a ISO 31000 proporciona um nível de garantia em termos de resiliência económica, reputação profissional e resultados ambientais e de segurança. Num mundo de incerteza, a ISO 31000 é feita sob medida para qualquer organização que procura uma orientação clara sobre a gestão de riscos. A norma atualmente em uso é a ISO 31000: 2018 que difere de outras definições de risco nas avaliações de risco tradicionais como o risco não é definido apenas em termos das probabilidades de resultados negativos ou indesejáveis, mas o foco está na gestão de incertezas. A norma possui um guia prático do seu uso como se pode ver na figura 3 [3].



Figura 3 - Guia Prático ISO 31000:2018 - Risk management [3]

A norma compreende os princípios, estrutura e processo de gestão de riscos. A estrutura fornece orientação sobre como os processos de gerenciamento de riscos podem ser integrados em um ambiente organizacional específico, ou seja, nas atividades e

funções de uma organização. O processo de gestão de risco ISO 31000:2018 é considerado como um processo iterativo, que inclui as seguintes etapas [34]:

- 1) Definir o objetivo, contexto, critérios;
- 2) Avaliação de risco (incluindo identificação de risco, avaliação de risco e análise de risco;
- 3) Tratamento de risco;
- 3) Registo e notificação;
- 5) Monitorização e revisão;
- 6) Comunicação e consulta.

A gestão de riscos precisa ser baseada em informações factuais, oportunas, relevantes, precisas e compreensíveis. As avaliações de risco devem utilizar informações históricas e atuais, e cenários futuros também devem ser incluídos. Estes princípios devem ser integrados na estrutura e no processo de gestão de riscos da organização [34].

Contudo, a ISO 31000 não pode ser utilizada para fins de certificação, mas fornece orientação para programas de auditoria interna ou externa. As organizações que o utilizam podem comparar as suas práticas de gestão de risco com uma referência reconhecida internacionalmente, fornecendo princípios sólidos para uma gestão e governação corporativa eficazes [3].

2.2.1 Tipos e Técnicas de análise de risco

As análises de risco são realizadas para que se identifique riscos, os efeitos resultantes do risco e os fatores causais do risco [35]. As técnicas são metodologias que podem ser aplicadas para apresentar as causas, consequências e formas de eliminação dos riscos contidos em um sistema de estudo. As análises são realizadas para examinar

um sistema, subsistemas, instalação, componentes, software, pessoas e as suas relações. Análises de risco podem ser divididas em duas categorias:

- Tipos de análise de risco – Define a categoria de uma análise, e estabelece o tempo de análise, a intensidade de incidência do detalhe e a cobertura do sistema;
- Técnicas de análise de risco – Define uma metodologia de análise única (como por exemplo a AAF). Estas incidem numa metodologia de análise única, de onde são fornecidos resultados específicos [35]. Na tabela 1 é possível ver a diferença entre tipo e técnicas de análise de risco.

Tabela 1- Distinções entre tipos e técnicas de análise de risco [35]

Tipo	Técnica
-Estabelece onde, quando e o que analisar.	-Estabelece como a análise é efetuada.
-Estabelece uma tarefa de análise específica num tempo específico num ciclo de vida programado.	-Estabelece uma metodologia de análise única e específica.
-Proporciona um foco num design específico.	-Fornece informação para satisfazer a intenção do tipo de análise.

Existe mais de 100 diferentes técnicas de análise, e este número tem vindo a aumentar, sendo que muitas destas são pequenas variações de outras, e onde muitas não são usualmente utilizadas. As técnicas de análise podem ser diferenciadas por:

- Técnicas indutivas – O raciocínio indutivo está associado a um processo lógico onde se tem mais informação do que simplesmente a experiência que tenha ocorrido. A veracidade da conclusão apenas pode ser verificada em termos de experiência futura, e a certeza apenas pode ser verificada, caso todas os casos possíveis tenham sido examinados. Um exemplo de técnicas deste caso é a FMEA [35];
- Técnicas dedutivas – O raciocínio dedutivo é um processo lógico onde a conclusão advém de uma série de premissas e não contem mais informação além destas. Ou seja, a conclusão apenas pode ser retirada, tendo em contas estas. Caso estas sejam

verdadeiras, pode-se afirmar que a conclusão não é falsa. Um exemplo de técnicas deste caso é a análise da árvore de falha [35].

A força aérea portuguesa classifica os riscos em [36]:

- Risco identificado – Risco que pode ser determinado através de análises e técnicas;
- Risco não identificado – Risco real e importante que não foi quantificado;
- Risco total – Risco que é a soma do risco identificado com o não identificado;
- Risco aceitável – Risco que é uma parte do risco identificado que se mantém sem controlo e é aceite por quem toma a decisão;
- Risco não aceitável – Risco que não pode ser tolerado, como o nome indica;
- Risco residual – É que permanece, mesmo após todos os esforços de gestão, e é a soma do risco aceitável com o risco não identificado [26].

2.3 Análise de modo e efeito de falha (FMEA)

A análise do FMEA foi apresentada pela primeira vez em 1920 mas a sua utilização aumentou significativamente para corresponder às demandas da indústria aeroespacial em finais da década de 1950 e inícios da década de 1960 para análises de fiabilidade e segurança, tendo sido mais tarde adaptado para outras indústrias até ser uma ferramenta indispensável para inúmeras empresas nas mais diversas áreas [37-39]. O documento inicial foi conhecido como MIL-P-1629, e mais tarde renomeado como MIL-STD-1629 em 1981 [40].

O FMEA é amplamente usado na área da engenharia e gestão de ativos sendo bem conhecido como uma abordagem estruturada, sistemática e proativa para analisar e identificar modos falhas de sistemas de forma a que com recursos limitados se possam obter as respostas mais razoáveis [41-43]. É uma análise de perigos/riscos que poderá ter em conta um estudo de máquinas, componentes individuais ou de serviços prestados

como atendimento ao público para identificar modos de falhas e as consequências. Um exemplo será a identificação de um componente que poderá ser uma fonte potencial de risco à segurança, este é listado em folha/tabela e são realizadas algumas perguntas como[44]:

- Quais são os modos de falha;
- Qual é a consequência dos modos de falha;
- Que problema cria à sua volta e no meio ambiente;
- O nível dos e risco que deve ser classificado (Alto, moderado, baixo, etc.);
- A probabilidade de falha;
- A sua detetabilidade, ou seja, ou quão complexo é encontrar a falha;
- O que pode ser feito para minimizar/retirar as consequências do fracasso.

Ao contrário do estudo do HAZOP, que é orientado para funções operacionais, o FMEA é orientado para componentes, suas funções e falhas potenciais [45].

Com base nos resultados o risco pode ser calculado, e é feita uma avaliação onde são discutidas as medidas a ser tomadas, para evitar as falhas [44]. É amplamente usado devido à sua simplicidade e eficácia comprovada nas diversas áreas não só de engenharia, visto um dos seus ponto forte que é conseguir identificar possíveis falhas e suas causas antes que elas aconteçam [41], [46]. É preciso entender que um modo de falha é na essência uma categoria de falha, que é descrito como um produto ou um processo que não é capaz ou não será capaz de executar uma determinada função, quer seja ela em termos de design ou de requisito com base no que os usuários ou clientes finais esperariam ou precisavam. Alguns exemplos de modos de falha no âmbito da engenharia mecânica que podem acontecer são deformação, desalinhamento, vibração, fadiga. [47]. As causas das falhas que têm um enorme impacto e são sem dúvida, dignos de atenção. Portanto, identificar primeiro estes fatores é benéfico e essencial para a segurança e estabilidade do sistema. Outro ponto digno de nota é que, no próprio processo de análise e gestão de riscos do sistema, muitas vezes vê-se primeiro o resultado e depois julga-se a causa. Da mesma forma que normalmente primeiro aparece um modo de falha específico, e só depois os técnicos ou gestores explorarão os seus motivos para evitar as falhas mais graves. Para fazer a alocação mais razoável de recursos limitados, é necessário “prescrever o remédio certo” para um modo de falha e tratar tanto os sintomas como as causas profundas [43].

Cada um dos critérios será determinado pelos valores da Severidade (S) que demonstra a gravidade dos efeitos da falha, o valor da Ocorrência (O) que demonstra com que frequência pode ocorrer e o valor de Detetabilidade (D) que deteta as falhas ou a probabilidade dos seus efeitos antes de sua ocorrência [48]. O cálculo do número de prioridade de risco (RPN) é tradicionalmente feitos usando na equação 1 e figura 4 que indica as usuais maneiras de obter as variáveis [49]:

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

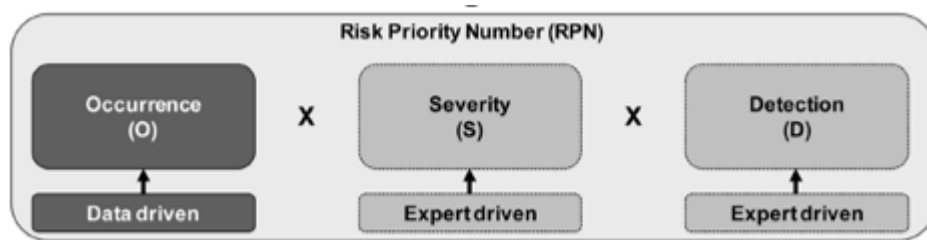


Figura 4 - Variáveis do cálculo do RPN e sua forma de obtenção [1]

O FMEA pode ser aplicado durante todas as fases do ciclo de vida do projeto, incluindo no início do projeto, na instalação e durante a operações. O FMEA, quando usado durante a fase de projeto, tem o potencial de prevenir falhas, evitando assim um redesenho dispendioso ou permitindo que os pontos fracos sejam identificados e corrigidos antes de entrar no local [45]. A partir da figura 5 é apresentado as etapas pelo que o FMEA passa para obter os resultados pretendidos.

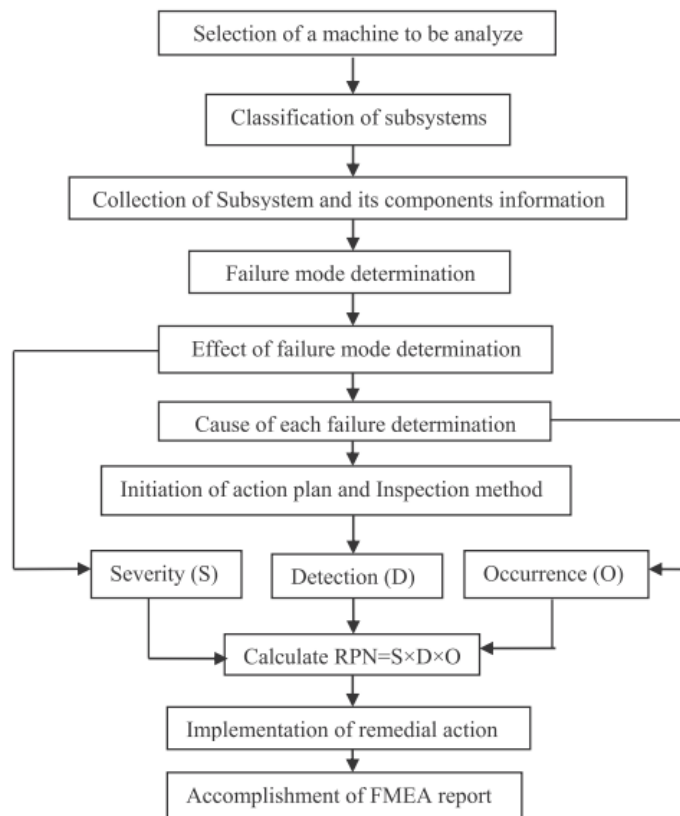


Figura 5-Etapas do processo do FMEA [50]

O FMEA sendo uma ferramenta de análise de risco também possui alguns pontos fracos, sendo eles as dificuldades em encontrar as causas raízes dos potenciais do risco, avaliar os fatores de risco com precisão, definir um critérios de escala, que não são claros e duvidosos, as escalas de prioridade não lineares de 1 a 10, subjetividade e erro humano, preconceito, o nível de importância das variáveis que é semelhante, duplicação do RPN e a sua própria formulação [39]. Embora o FMEA seja amplamente utilizado na indústria, o método apresenta grandes deficiências como já descrito. O método tradicional é então baseado em fatores igualmente ponderados para as três variáveis S, O e D, pois em casos de estudo real um equilíbrio da importância entre essas variáveis seja pouco provável. Além disso, diferentes combinações de pontuações das três variáveis podem levar ao mesmo RPN. No entanto, o impacto do risco pode ser completamente diferente de caso para caso. Na pior das hipóteses, pode levar a modos de falha de alto risco a passarem despercebidos [1].

2.3.1 RPN

O último passo do FMEA é então determinar o RPN. Este é o produto das variáveis de Severidade, Ocorrência e Detetabilidade, que são as bases para a priorização dos modos de falha. Esse valor pode ser usado para classificar a ordem das prioridades no processo uma vez que um maior RPN pode levar a indicar de uma situação mais crítica como demonstrado na tabela 2 [51] [52]. Com a ajuda da estrutura do FMEA baseada em dados, o RPN calculado pode ser usado como suporte à decisão para recomendações relacionadas às atividades de manutenção, bem como durante a definição de estratégias de manutenção. Portanto, os modos de falha podem ser priorizados classificando o RPN em ordem decrescente [1]. Com a categorização do RPN, é então possível passar à fase de análise de como saber determinar as ações antecipatórias, mitigações e estratégias contra o mais alto nível de risco [52]. A tabela 2 indica os possíveis valores para uma escala de risco no RPN.

Tabela 2-Escala valor RPN e o seu nível de risco [52]

Nível de Risco	Valor da escala do RPN
Muito baixo	$RPN \leq 200$
Baixo	$200 \leq RPN \leq 400$
Médio	$400 \leq RPN \leq 600$
Alto	$600 \leq RPN \leq 800$

O RPN tradicional pode variar de 1 a 1000, isso acontece porque usualmente os valores das variáveis estão compreendidas entre 1 e 10. De maneira a facilitar a escolha desses valores eles são transformados em valores linguísticos para uma melhor interpretação como demonstrado na tabela 3 [45].

Tabela 3-Critério linguístico para um acidente de carro [52]

Rank	Criteria		
	Severity (S)	Occurrence (O)	Detection (D)
1-2	An incident with no significant impact, damage, or loss (no victim)	never happened (no one respondent has experienced it)	almost certainly detected (all respondents detected/experienced it)
3-5	events with minor loss and damage (the number of minor injuries, 1-2 events cause minor injuries)	seldom happened (experienced by 10 %-30 % of respondents)	easily detected (detected/experienced by 61 %-99 % of respondents)
6-7	hazardous events and major damage and losses (the number of serious injuries)	sometimes happened (experienced by 31 %-60 % of respondents)	could be detected if concentrated (detected/experienced by 31 %-60 % of respondents)
8-9	events with great loss and damage (≤ 5 fatalities)	often happened (experienced by 61 %-99 % of respondents)	hard to detect (detected/experienced by 1 %-30 % of respondents)
10	catastrophic events and tremendous damage and losses (> 5 fatalities)	always happened (experienced by all the respondents)	very hard to detect (no one respondent has detected/experienced it)

O RPN fornece uma hierarquia da criticidade das falhas identificadas e pode ser calculado alocando números qualitativos às três variáveis, muitas vezes com base na consulta de especialistas, dados de perdas e experiências anteriores das equipes do FMEA [45]. Com base no resultado é necessário fazer uma avaliação do valor do RPN calculado e posteriormente decidir quando e que tipo de medidas serão tomadas para fazer a redução do valor original do RPN de forma a que se consiga sempre o menor valor possível uma vez que essa é uma das filosofias a seguir quando se obtém um dado valor de RPN, tentar sempre reduzi-lo [53]. A figura 6 mostra um diagrama do processo e análise do RPN [45].

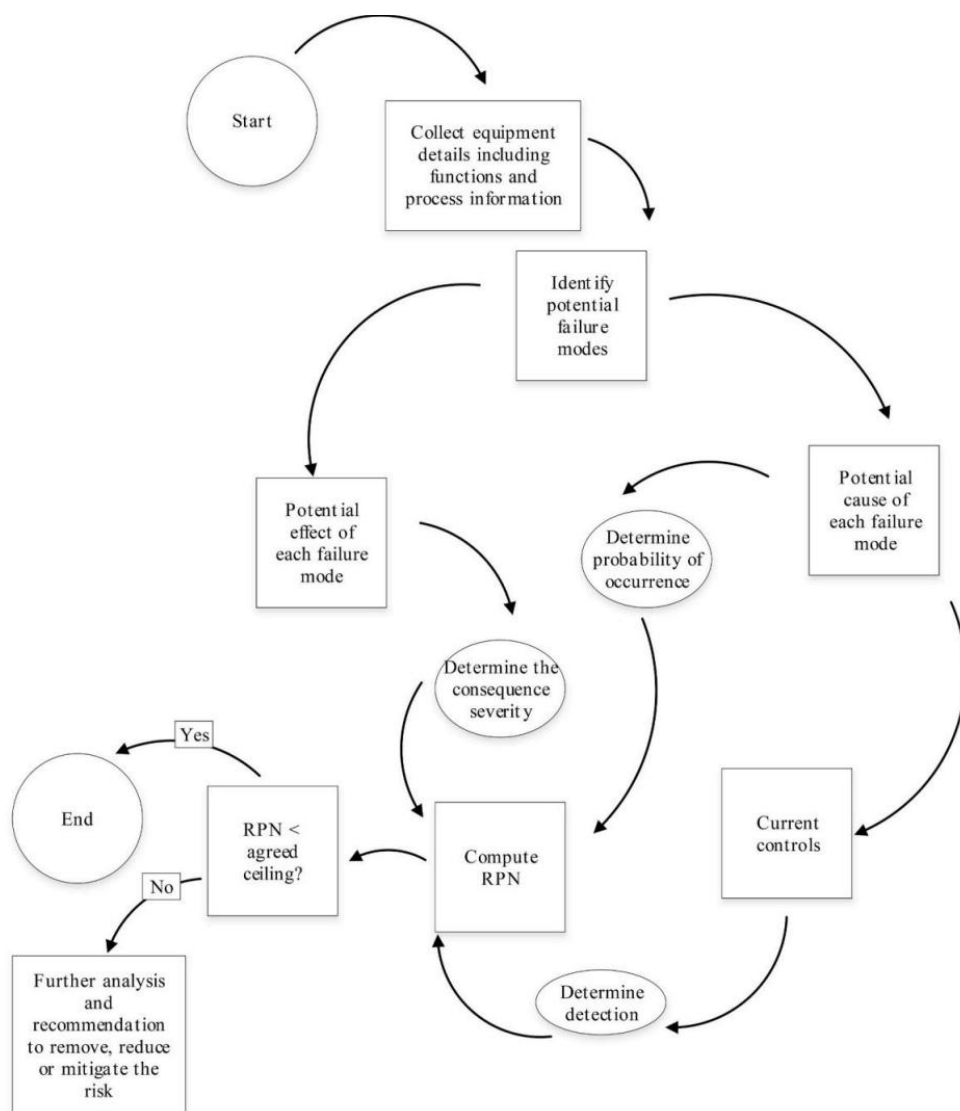


Figura 6-Processo geral do cálculo e análise do RPN [45]

A figura 7 mostra a visualização do RPN para distintos modos de falhas em duas áreas diferentes. Neste caso, a asa esquerda e a cauda de um avião são exemplarmente escolhidas como as áreas em estudo. Os diferentes valores de RPN para os modos de falha A a D são definidos. Os valores individuais de RPN estão destacados com cores de acordo com o princípio de um mapa de calor. Isto permite uma rápida e fácil interpretação dos resultados, o que pode ajudar em outras atividades de manutenção, como inspeção baseada em condições para modos de falha particularmente críticos. Com base nesses resultados, são desenvolvidas recomendações para modos de falha de alto risco. Neste contexto, podem ser desenvolvidas estratégias de manutenção especialmente baseadas nas condições analisadas. Por exemplo, se o RPN de um modo de falha exceder um limite específico (muitas vezes impostos pelas próprias empresas),

certas medidas poderão ser fornecidas. Aqui, neste caso específico, uma inspeção pode ser agendada e ter os recursos correspondentes, como máquinas, materiais e trabalhadores. Portanto, mesmo funcionários inexperientes podem detetar e analisar os modos de falha, bem como planear as atividades de manutenção necessárias com mais eficiência e precisão. Além disso, ao utilizar dados operacionais, é possível ter resultados do FMEA aumentados e a precisão das estratégias e medidas melhoradas [19].

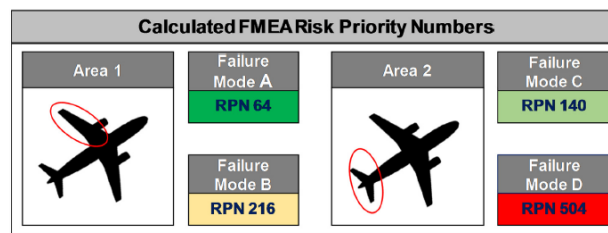


Figura 7 - Visualização do RPN para diferentes áreas e modos de falha [1]

2.3.2 Limitações do RPN

O método RPN tradicional apresenta ainda muitas irracionalidades que podem causar confusão na hora de fazer a sua análise [51]. Primeiro ponto, valores idênticos do RPN podem ser gerados a partir de diferentes fatores de risco, no entanto, as suas consequências de risco ocultas podem ser muito diferentes [49]. Por exemplo, se dois eventos tiverem O, S e D de 5, 1, 10 e 5, 10, 1 respetivamente, ambos terão um RPN de 50. Isto implica que o mesmo nível de atenção é necessário para mitigar os dois eventos de riscos, embora sejam diferentes. Isto pode causar uma aplicação incorreta de recursos que são limitados e/ou fazer com que um modo de falha de alto risco seja perdido [45].

O segundo ponto, é um desafio fornecer *feedback* numérico preciso sobre os parâmetros de risco aos especialistas. Assim, um ligeiro desvio de um *rating* pode afetar dramaticamente o RPN visto que diferentes equipas tem diferentes opiniões para um mesmo modo de falha [49]. Foi realizado um caso de estudo, mencionado na referência [39] em que duas equipas do FMEA analisaram vários modos de falha para chegar à conclusão se realmente haveria alguma diferença significativa. No parâmetro severidade do gráfico da figura 8, houve algumas diferenças, o que representou uma grande lacuna na avaliação de risco entre duas equipas. No ID de Risco HW02, a escala de risco de

severidade da equipa 1 foi de 6, enquanto a da equipa 2 foi de 1. No ID de Risco HW10, a equipa 1 determinou 7 para a escala de risco de severidade, enquanto a equipa 2 determinou 1 para a escala de risco de severidade. A diferença na avaliação da escala da severidade certamente teve um efeito significativo nos resultados da priorização de riscos. O nível de importância de cada parâmetro (severidade, ocorrência e detetabilidade) foi idêntico (linear). Portanto, se fosse multiplicado por outros valores, afetaria muito a quantidade de RPN obtida [39].

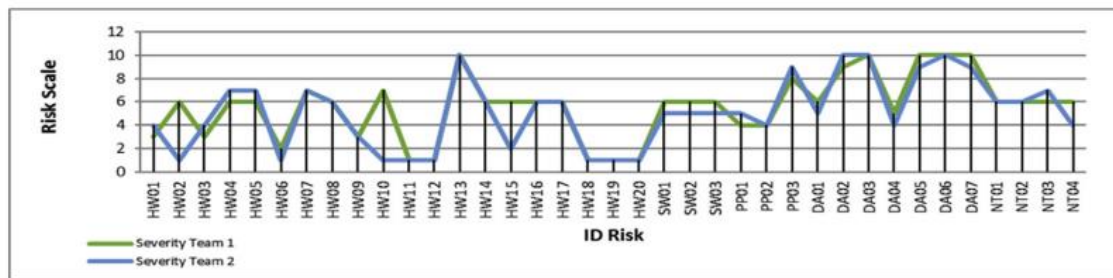


Figura 8 - Comparação da avaliação dos riscos de severidade [39]

A diferença na avaliação de risco entre as duas equipas no parâmetro de ocorrência não foi significativa, como indicado na figura 9, isso prova que ambas as equipas compreenderam os eventos de risco que ocorreram no seu ambiente muito provavelmente devido a historial de falhas que são obtidos através de uma base de dados que se vai atualizando [39].

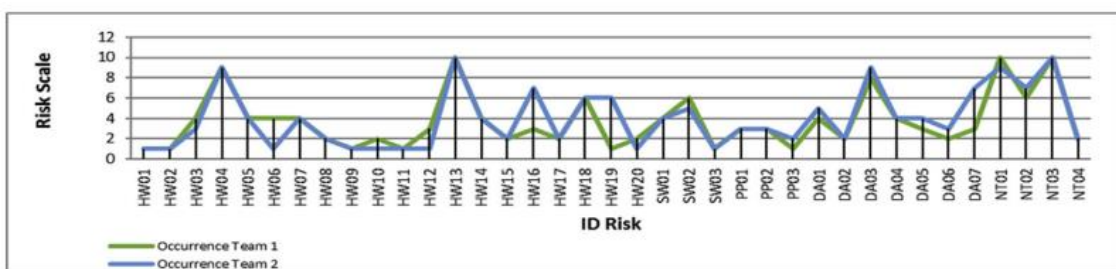


Figura 9-Comparação da avaliação dos riscos de ocorrência [39]

O parâmetro da detetabilidade apresentou o maior nível de diferença em relação aos demais parâmetros como se observa na figura 10. Como um exemplo do risco com o HW01 e o IDs de risco HW 02, a equipa 1 determinou a escala de detetabilidade 10, enquanto a equipa 2 determinou a escala de detetabilidade 1. A lacuna na determinação

da escala da detetabilidade por ambas a equipa demonstra uma grande diferença que vai ser significativa no RPN.

A consistência das duas equipas na avaliação do parâmetro de detetabilidade foi influenciada por questões subjetivas. As questões subjetivas pretendidas basearam-se apenas na experiência e no conhecimento [39].

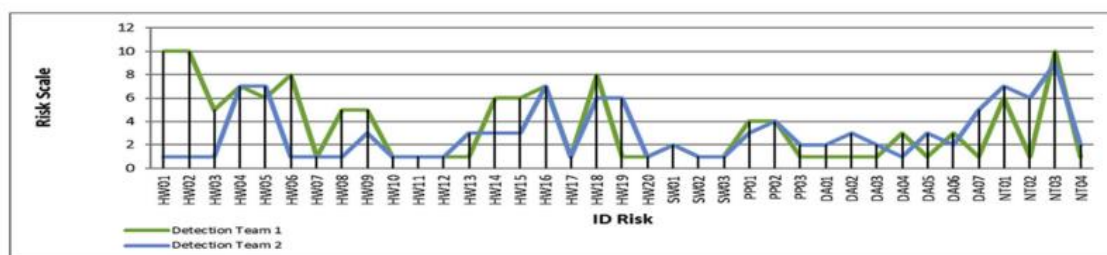


Figura 10-Comparação da avaliação dos riscos de detetabilidade [39]

Terceiro ponto, na determinação dos valores do RPN, os pesos relativos dos fatores de risco não são considerados [49]. De acordo com os resultados da revisão de literatura realizada por (Liu et al., 2013), o terceiro ponto é dos pontos significativamente mais frágeis do FMEA pois reside em este não possuir valores de peso nas variáveis e porque dá a entender que cada variável tem a mesma importância [39], [54]. A suposição de que três fatores de falha contribuem igualmente para o fator de risco RPN de um evento, na prática, é pouco provável que isto aconteça, pelo menos na maioria das circunstâncias. O fator de falha Severidade é muitas vezes mais importante do que outros fatores de falha, razão pela qual os profissionais muitas vezes olham para as colunas da Ocorrência e Severidade do FMEA isoladamente. Além disso, a análise não leva em conta a experiência e conhecimentos dos peritos participantes, presume-se apenas que todos tenham o mesmo nível de experiência e conhecimentos [45].

Quarto ponto, a fórmula para determinar o RPN é discutível e carece de base científica, muitos investigadores questionam a lógica por trás da multiplicação da S, O e D para a obtenção do RPN [49].

Redimensionar os valores reais de cada fator de risco para valores entre 1 e 10 sem considerar os seus graus de risco locais pode não resultar numa avaliação de risco realista. Por outras palavras, a classificação não poderia necessariamente refletir os níveis de risco percebidos localmente na região de estudo [42]. É então por isso que apesar de no RPN tradicional ou mesmos no cálculo do “RPN modificado” ao usar

valores entre 1 a 10 para definir a severidade a detetabilidade e a ocorrência não quer dizer que exista uma regra que assim o seja uma vez que existem muitos exemplos na literatura que usam outras tipos de escalas como de 1 a 5 para todas as variáveis bem como usar diferentes escalas para cada variável como demonstrado na tabela 4 [55].

Tabela 4-Rating de escala para a severidade, ocorrência e detetabilidade de uma resposta rápida do sistema de hospital [55]

Severity Levels (SL) of the Effect of the Failure Modes	Rating
No harm to patient/no effect on detection of patient deterioration	1
Non-documented vital signs or NZEWS or incorrect calculated NZEWS	2
Actual or potential delay to or lack of detection of patient deterioration	3
Occurrence Level (OL) of the Failure Modes	Rating
Once in more than a year	1
Once in a year	2
Once in six months	3
Once in three months	4
Once a month	5
Once a week	6
Once every 3 days	7
Once per day	8
One per 8-hour shift	9
More than once per 8-hour shift	10
Detection Level (DL) of the Failure Modes when they occur	Rating
100% detection	1
>50% detection	2
11-50% detection	3
<10 % detection	4
0% detection	5

Apesar das várias debilidades que o FMEA e o RPN apresentam, na literatura, diferentes métodos têm sido propostos para melhorar os processos de manutenção de bens de investimento industriais. É o caso do *fuzzy logic* [1].

2.4 Fuzzy Logic – teoria dos conjuntos fuzzy

O *fuzzy logic* é uma metodologia de resolução de problemas de sistemas de controlo, adequada para implementação em diversos sistemas, desde sistemas simples, a sistema mais complexos. Num sentido mais específico, o *fuzzy logic* é uma extensão da lógica *multivalued* cujo objetivo é o raciocínio aproximado em vez da solução exata [56]. A Teoria dos Conjuntos *Fuzzy* foi introduzida pela primeira vez por Zadeh em 1965 [57]. A *fuzzy logic* aparece para conseguir combater essas ambiguidades entre decisões. Passa-se da ideia da lógica Booleana que apresenta os valores 1 e 0 que correspondem respetivamente a verdadeiro e falso e passa-se a ter “valores intermédios” para poder criar ideias entre o simplesmente ser “só verdadeiro” e “só falso”. Esta

precisão da lógica Booleana pressupõe que as estruturas e parâmetros do modelo sejam conhecidos e não haja ambiguidade ou imprecisão [45] [49]. A lógica Booleana pode ser descrita a partir da equação 2:

$$X_A = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (2)$$

Na equação 2 o elemento x do universo X só pode estar associado a um conjunto A sem exceção. Já com o conjunto *fuzzy* por sua vez pode ser como indicado na equação 3:

$$\bar{A} = \{(x, \mu_{\bar{A}}(x) | x \in X) \text{ and } 0 \leq \mu_{\bar{A}}(x) \leq 1\} \quad (3)$$

Em que $\mu_{\bar{A}}(x)$ é a função de pertinência do elemento x no universo X para o conjunto do fuzzy A . Um $\mu_{\bar{A}}(x)$ de 1 indica a pertença completa plena e 0 não indica nenhuma pertença e qualquer número intermediário representa um grau em que $\mu_{\bar{A}}(x)$ pertence a uma determinada classe. Os números difusos podem ser representados por diferentes formatos de gráfico, dependendo do contexto da aplicação. Os tipos mais comuns de números difusos são triangulares, trapezoidais e gaussianos [45]. O caso dos gráficos triangulares são sem dúvida os mais fáceis de trabalhar e foram os usados na análise de estudo deste trabalho e podem ser representados matematicamente a partir da equação 4:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq b \\ \frac{x - b}{m - b}, & x \in (b, m) \\ 1, & x = m \\ \frac{c - x}{x - m}, & x \in (m, c) \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (4)$$

Onde m é o valor médio, b e c são os limites inferior e superior respectivamente, para os valores de $\mu_{\bar{A}}(x)$ acima do valor zero.

Utilizando a Teoria dos Conjuntos difusos é possível melhorar o FMEA tradicional usando funções de utilidade ao determinar as classificações de Severidade, Ocorrência e Detetabilidade durante a avaliação. Também oferece uma nova forma de determinar as classificações de risco de eventos de falha. Um novo método criado a

partir desta premissa pode compensar a falta de dados com a integração das opiniões e a ponderações dos especialistas que fazem a análise. O uso das variáveis linguísticas garante que o método esteja alinhado com a síntese de linguagem natural ou artificial para tomada de decisão sob incerteza. Com o *fuzzy logic*, pode-se especificar regras de mapeamento na forma de vocabulário, em vez de números. O *fuzzy logic* é uma ferramenta de decisão que permite auxiliar na tomada de decisões pelo que é uma metodologia que vai ajudar no cálculo do RPN durante este trabalho pois vai permitir a criação de pesos para as variáveis S, O e D. Essa ferramenta abrangente fornece uma flexibilidade na tomada de decisões e considera, subjetividade, incerteza e imprecisão; portanto, é aplicado para a determinação precisa das variáveis S, O e D. O maior benefício das aplicações da teoria difusa na avaliação de riscos é que a avaliação do sistema resultante é qualitativa e operacional com variáveis linguísticas, como deve ser admitido já que certos eventos simplesmente não podem ser descritos apenas em números [47].

Como o *fuzzy logic* lida com bases de conhecimento subjetivas, incompletas ou não confiáveis, ela está bem equipada para estabelecer os pontos principais de qualquer sistema com facilidade e precisão. Além disso, o conceito de *fuzzy logic* está próximo das palavras humanas e da intuição, de modo que o número e a variedade de aplicações tem vindo a aumentar significativamente nos últimos anos. Para obter o valor de saída é necessário fazer a principal abordagem do fuzzy, tomando a variável de entrada que consiste no uso da regra *if then*. As regras *if then* são expressas diretamente por palavras humanas, e cada palavra é considerada um conjunto difuso [56].

O método do *fuzzy logic* pode ser usado como um processo para combater as limitações encontradas no cálculo do RPN. É possível observar vários exemplos em diversos trabalhos e artigos. Um dos estudos analisam os problemas do sistema de gaseificação de água supercrítica (SGA) durante o comissionamento e operação aplicando o FMEA e o FMEA fuzzy com base em lógica *fuzzy*, que valida a viabilidade e eficácia do FMEA para a gestão de risco do sistema SGA [58], [43]. Um outro estudo amplia a abordagem do FMEA clássica considerando a tomada de decisão dentro de um grupo sob ambiente difuso que é sensível a todas as entradas, incluindo variáveis linguísticas ou pesos de importância de especialistas. Esta abordagem é chamada de FMEA desenvolvida pelo *fuzzy* e é aplicada a um sistema de aterragem de aviões [59].

A informação é fundamental para fazer uso de capacidades de inteligência artificial, como o raciocínio automatizado, que permite aos computadores realizar

trabalhos tediosos e repetitivos atualmente realizados por pessoas técnicas e, assim, melhorar a produtividade e o controle da qualidade [41].

Como se sabe, o FMEA é uma ferramenta de decisão em grupo, que necessita de diferentes pessoas/especialistas para decidir e dar opiniões. Poucos são os investigadores que consideram as informações distintas do FMEA sob tal situação. Os novos métodos podem não apenas cobrir a perspectiva de diversidade da equipa FMEA, bem como lidar com a imprecisão e subjetividade sob um ambiente incerto, mas também evitar as perdas de informações valiosas no processo de avaliação de risco. O mérito deste método é que ele considera diversas informações, em vez de informações de tipo único. Então, pode-se usar a probabilidade de intervalo para analisar os RPN's para fornecer uma avaliação de risco razoável [46]. As operações anteriormente descritas para a lógica booleana indicava que os valores de pertinência são sempre 1 (completamente verdadeiro) ou 0 (completamente falso), como o *fuzzy logic* é uma derivação da lógica booleana este mantém as operações lógicas consistentes como a operação lógica padrão. As operações lógicas mais fundamentais são AND, OR e NOT. Ao contrário da operação lógica padrão, os operadores A e B são valores de pertinência dentro do intervalo [0, 1]. Em operações lógicas *fuzzy*, o AND lógico é expresso pela função mínimo, então a afirmação A AND B é igual a mínimo (A, B), enquanto o OR lógico é definido pela função máximo, portanto A OR B torna-se equivalente a máximo (A, B). E o NOT lógico faz com que a operação NOT A se torne a operação $1 - A$.

O sistema de inferência *fuzzy* (FIS) (*fuzzy inference system*) tem 3 estruturas básicas que são a base das regras que são usadas para fazer a seleção das regras difusas (*fuzzy rules*). No banco de dados, este componente é usado para definir o valor de pertinência do conjunto *fuzzy* e o mecanismo de raciocínio usado para gerar a saída das operações realizadas no conjunto *fuzzy* [56]. De um modo geral, existem três tipos de FIS, o Mamdani, Sugeno e Tsukamoto. Todos esses três métodos podem ser divididos em dois processos. O primeiro processo é “fuzzified” os dados, ou seja, os valores *crisp* (valores único) das variáveis de entrada em valores de pertinência de acordo com os conjuntos *fuzzy* apropriados, e nestes três métodos o processo inicial é exatamente o mesmo, onde os processos vão variar será quando os resultados de todas as regras são integrados em um único valor preciso [60], [61]. Ao longo do capítulo 3 foi usado o método Mamdani pois este apresenta resultados coerentes apesar da sua simplicidade.

Resumindo, existem um ou mais valores de entrada que são “*fuzzified*” e que são avaliados usando de base as regras criadas e são “*defuzzified*”, para as saídas com um valor no caso do Mamdani [47].

2.4.1 Mamdani

O FIS mais difundido é o método Mamdani, que devido à simplicidade da sua estrutura, destaca-se como um método intuitivo e de fácil utilização, o que o torna mais adequado para aplicações de sistemas especializados baseados no conhecimento de especialistas humanos. O Mamdani FIS é comumente usado na solução de problemas e desafios de tomada de decisão de um modo geral [47].

A inferência difusa de Mamdani foi introduzida pela primeira vez como um método para criar um sistema de controlo sintetizando com um conjunto de regras de controlo linguístico obtidas de trabalhadores humanos experientes [62].

Para obter a saída do valor são necessários 4 passos [61]:

- Estabelecimento do conjunto *fuzzy*, definição do conjunto *fuzzy* e a determinação do grau de pertinência da entrada *crisp* em um conjunto *fuzzy* e implicação da função de aplicação;
- Avaliação das regras *fuzzy* para poder gerar a saída de cada regra, (regra de composição);
- Agregação ou combinação das saídas de todas as regras;
- “*defuzzified*”, cálculo de saída *crisp*.

O método Sugeno é praticamente o mesmo método, a diferença está no facto de que a saída não é um conjunto *fuzzy* mas sim uma constante ou uma equação linear [61]. Num sistema Mamdani, a saída de cada regra é um conjunto *fuzzy*. O processo de inferência de um sistema Mamdani é resumido na figura 11 [63].

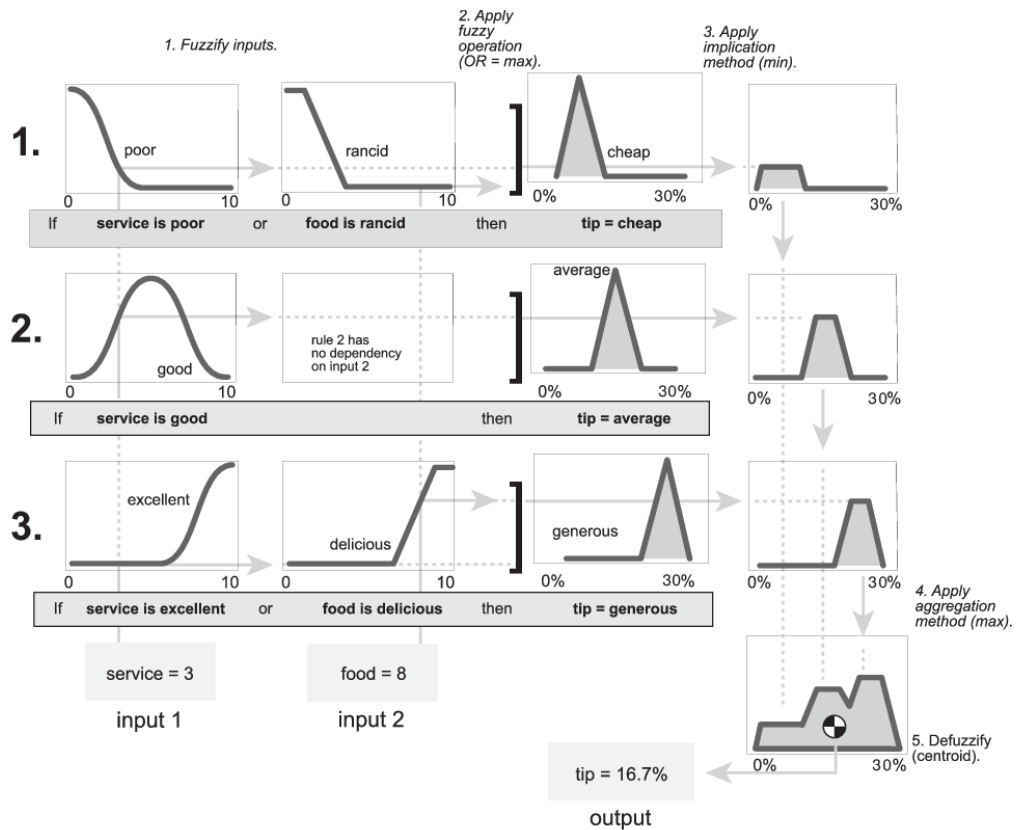


Figura 11- FIS método de Mamdani e posterior "desfuzificação" em relação ao serviço, comida e gorjeta [63]

Pela figura 12 é possível observar que na regra 1 temos a seguinte citação em que descreve o seguinte:

- **Se** serviço **é** pobre **ou** a comida **é** rançosa então a gorjeta **é** baixa.

A partir desta regra e sabendo os valores dos *inputs* que neste exemplo é 3 para o serviço e 8 para a comida, sabendo que estes valores se encontram numa escala de 0 a 10 constrói-se o conjunto fuzzy seguinte maneira:

Para a formação da área do serviço coloca-se uma linha no gráfico onde o valor 3 irá intercepar o gráfico e faz-se o mesmo para o gráfico da comida, mas com o valor 8, como indicado na figura 12.

Como a regra está definida com um **ou**, o valor ao qual irá intercepar o gráfico do output será o máximo atingido no eixo vertical, neste caso será a linha do gráfico do serviço, e, portanto, tudo o que está abaixo dessa linha de intercessão do gráfico do output será um conjunto *fuzzy*. Caso a regra possuísse um **e (and)**, a linha que iria

interceptar o gráfico seria o mínimo, ou seja, o valor mais baixo no eixo vertical, que neste caso seria o da comida.

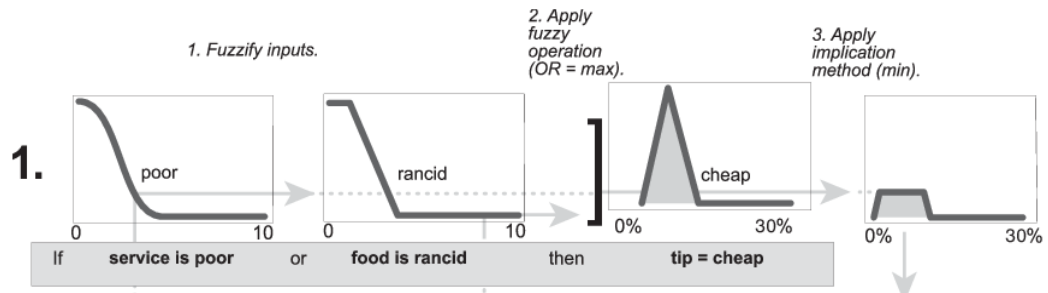


Figura 12 - Exemplo do desenvolvimento de uma regra pelo Mamdani [63]

Procede-se da mesma forma para o resto das regras, para no final haver uma junção de as áreas e formar o conjunto fuzzy final que posteriormente será “defuzzified” a partir de um dos métodos existentes, como é o caso do método do centroide, método esse que foi usado ao longo deste trabalho, ou bisector, e assim obter-se o valor que se procura. Um outro exemplo é apresentado na figura 13 [64].

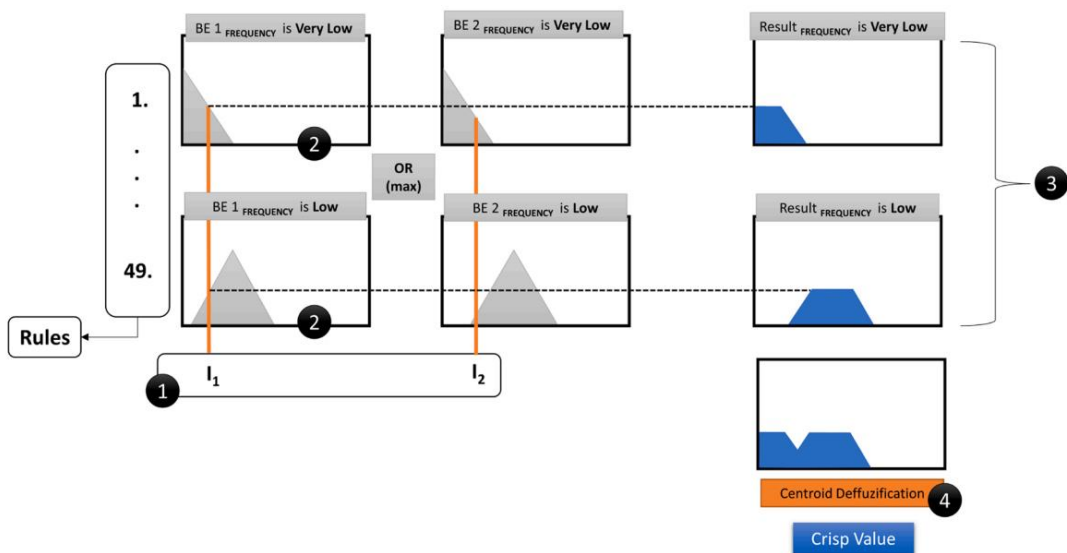


Figura 13 -- Exemplo geral de uma aplicação Mamdani com 49 regras [64]

A partir do conjunto *fuzzy*, para obter um só valor (*crisp*), é necessário passar à etapa da “defuzzified”, e para proceder a esse passo, pode ser usado o método do centroide que é

calculado usando a equação 5, onde $\mu(x_i)$ é o grau de pertença do conjunto e x_i o seu ponto no universo do discurso [64].

$$centroid_{result} = \frac{\sum_i \mu(x_i) x_i}{\sum_i \mu(x_i)} \quad (5)$$

De modo resumido a saída de cada regra é um conjunto *fuzzy* derivado da função de associação de saída e do método de implicação do FIS. Esses conjuntos *fuzzy* de saída são combinados em um único conjunto *fuzzy* usando o método de agregação do FIS. Então, para calcular um valor final de saída nítida, o conjunto difuso de saída combinado é “*defuzzified*” usando métodos como o bisector ou centroide [63].

3 Metodologia-Alteração da função

RPN

Neste capítulo inicia-se o processo para a realização dos novos modelos propostos para a obtenção do RPN para que fosse possível mitigar os problemas que são identificados na literatura e indústria.

Foram realizados dois métodos com propostas diferentes em que ambos os casos foram obtidos com a ajuda do *fuzzy logic* do *matlab*.

3.1 Método 1

No primeiro caso o principal objetivo é realizar uma alteração do peso da severidade, para que esta variável tivesse um impacto maior em relação à Ocorrência e Detetabilidade.

Neste processo que consiste em usar o *fuzzy logic* do *matlab* um dos passos de maior importância é a criação das regras.

Para a formulação das regras foi criada uma lógica que permitisse inserir no programa para que que cria-se um processamento (pensamento mais humano), que admite-se a severidade como variável com um maior peso.

O formato das regras no FIS, nomeadamente o método Mamdani, tem a seguinte estrutura:

- **IF** Severidade **is** X **and** Detetabilidade **is** Y **and** Ocorrência **is** V **then** RPN **is** Z
– Base FIS do *fuzzy logic* do *Matlab*.
- Se Severidade é X e Detetabilidade é Y e Ocorrência é V **então** RPN é Z.

Em que X, Y e V são os termos linguísticos que indicam o “valor” de cada variável do input, e Z o valor linguístico final do RPN (output).

A lógica começa por definir as variáveis linguísticas de cada variável S, O e D. Para a S foram criados 10 valores linguísticos, isto quer dizer que os valores de 1 a 10 que a variável S pode obter foram descritos por palavras que pudessem definir o perigo que estes valores apresentam. Na tabela 5 é possível observar os valores linguísticos para cada valor numérico.

Tabela 5- Valores linguísticos da severidade

Severidade		
1	Muito baixo 1	VL1
2	Muito baixo 2	VL2
3	Baixo 1	L1
4	Baixo 2	L2
5	Médio 1	M1
6	Médio 2	M2
7	Alto 1	H1
8	Alto 2	H2
9	Muito alto 1	VH1
10	Muito alto 2	VH2

As variáveis O e D foram divididas em 5 valores linguísticos, ou seja, os valores de 1 a 10 foram agrupados em intervalos de 2 em 2. A ideia a transmitir é que por exemplo os valores numéricos 1 e 2 teriam o mesmo valor linguístico, e o 3 e 4 teriam outro valor linguístico e assim sucessivamente como observa nas tabelas 6 e 7.

Tabela 6- Valores linguísticos para a Ocorrência

Ocorrência		
[1;2]	Pouco improvável	VL
[3;4]	Improvável	L
[5;6]	Mediano	M
[7;8]	Provável	H
[9;10]	Muito provável	VH

Tabela 7- Valores linguísticos para a Detetabilidade

Detetabilidade		
[1;2]	Muito fácil	VL
[3;4]	Fácil	L
[5;6]	Razoável	M
[7;8]	Difícil	H
[9;10]	Muito difícil	VH

A severidade foi dividida em 10 valores linguísticos, duas vezes mais que a ocorrência e a detetabilidade. Foi realizado desta maneira para criar uma maior sensibilidade na variável severidade, isto permite que ao trocar de valor mesmo que a diferença seja baixa pudesse ter um impacto significativo no valor final do RPN.

Por fim foi criado os valores linguísticos para o RPN. Neste caso em particular foi dividido em 20 termos linguísticos, foi assim definido porque ao criar mais valores linguísticos cria-se mais "áreas" e por consequência o processo do *fuzzy logic* terá uma maior gama de valores disponíveis fazendo com o a probabilidade de o RPN ser repetido é reduzida. Os valores linguísticos do output RPN estão indicados na tabela 8.

Tabela 8 - Valores linguístico do RPN

RPN		
Intervalo	Valor linguístico	Sigla
[1; 50]	Very Low 1	VL1
[26; 100]	Very Low 2	VL2
[63; 150]	Very Low 3	VL3
[107; 200]	Very Low 4	VL4
[154; 250]	Low 1	L1
[202; 300]	Low 2	L2
[251; 350]	Low 3	L3
[301; 400]	Low 4	L4
[351; 450]	Medium 1	M1
[401; 500]	Medium 2	M2
[451; 550]	Medium 3	M3
[501; 600]	Medium 4	M4
[551; 650]	High 1	H1
[601; 700]	High 2	H2
[651; 750]	High 3	H3
[701; 800]	High 4	H4
[751; 850]	Very High 1	VH1
[801; 900]	Very High 2	VH2
[851; 950]	Very High 3	VH3
[901 ; 1000]	Very High 4	VH4

A obtenção destes intervalos foi inicialmente obtida através da divisão do valor máximo do RPN tradicional (1000) pelo número de áreas que iriam ser criadas (20) como indicado na equação 6.

$$x = \frac{1000 \text{ (Valor máximo do RPN tradicional)}}{20 \text{ (Nº de áreas criadas)}} = 50 \quad (6)$$

Ou seja, o valor obtido de 50, significa que o valor final de cada intervalo será espaçado de 50 em 50 até chegar ao 1000. Já o valor inicial de cada intervalo foi obtido através da média do intervalo anterior, como segue o exemplo seguinte na equação 7:

$$x = \frac{26 + 100}{2} = 63 \text{ (aproximadamente)} \quad (7)$$

Ou seja o intervalo [63; 150] será o intervalo a seguir ao [26; 100] pois o valor final do intervalo é espaçado de 50 em 50 enquanto o valor inicial de cada intervalo é calculado pela média do intervalo anterior demonstrado na equação 7.

Após os intervalos estarem definidos é que se procede propriamente à lógica das regras. Para realizar este passo recorreu-se ao cálculo do RPN de forma tradicional, ou seja, a multiplicação das variáveis S, O e D. Foram realizados 250 cálculos pois foram usados os valores 1 a 10 uma vez que a severidade possui 10 valores linguísticos enquanto para representar ocorrência foram usados os valores máximos de cada intervalo, 2,4,6,8 e 10 pois estas últimas duas variáveis apenas possuem 5 valores linguísticos. Na tabela 9 é possível observar alguns dos cálculos realizados. Em anexo será possível ver as 250 combinações.

Tabela 9- Exemplo da multiplicação realizadas para posterior obtenção da variável linguística

Severidade	Ocorrência	Detetabilidade	Produto (RPN tradicional)
8	4	2	64
8	4	4	128
8	4	6	192
8	4	8	256
8	4	10	320
5	6	2	60
5	6	4	120
5	6	6	180
5	6	8	240
5	6	10	300
8	4	2	64
8	4	4	128
8	4	6	192
8	4	8	256
8	4	10	320

Com os resultados já realizados é posteriormente feita a análise de onde cada valor calculado irá se encaixar nos intervalos dos valores linguísticos do RPN. A tabela 10 apresenta os valores linguísticos da variável RPN, juntamente com os valores linguísticos da Severidade que foram adaptados aos intervalos do RPN. Esta tabela foi criada para auxiliar a construção do sentido de cada regra.

Tabela 10- Combinação das variáveis linguística severidade com as do RPN

Intervalo	Sigla RPN	Sigla Severidade
[1 ; 50]	VL1	
[26; 100]	VL2	VL1
[63; 150]	VL3	
[107; 200]	VL4	VL2
[154; 250]	L1	
[202; 300]	L2	L1
[251; 350]	L3	
[301; 400]	L4	L2
[351; 450]	M1	
[401; 500]	M2	M1
[451; 550]	M3	
[501; 600]	M4	M2
[551; 650]	H1	
[601; 700]	H2	H1
[651; 750]	H3	
[701; 800]	H4	H2
[751; 850]	VH1	
[801; 900]	VH2	VH1
[851; 950]	VH3	
[901 ; 1000]	VH4	VH2

É preciso prestar atenção ao valor linguístico da severidade pois será ela que vai dar a informação para onde irá cada resultado calculado. Os 250 cálculos efetuados irão para o intervalo a que pertencerem, ou seja se o valor for X terá de ir para o intervalo a que esse valor esteja representado. Mas existem casos que o mesmo valor está representado em dois intervalos diferentes, nessa situação deve-se olhar para o valor da severidade, verificar qual a sua variável linguística e o resultado irá para o intervalo que mais se aproxima da variável linguística da severidade. A seguir serão exemplificados os três principais casos possíveis:

- Caso nº1, equação 8

$$RPN = S \times O \times D = 1 \times 8 \times 2 = 16 \quad (8)$$

Este é o caso mais simples que pode acontecer uma vez que o único intervalo disponível será o intervalo [1; 50]. Portanto a regra ficará da seguinte forma:

IF Severidade is VL1 (1) and Ocorrência is H (8) and Detetabilidade is VL (2) then RPN is VL1 (16).

- Caso nº2, equação 9

$$RPN = S \times O \times D = 8 \times 4 \times 10 = 320 \quad (9)$$

Neste caso o valor calculado pode estar em dois intervalos distintos sendo eles [251; 350] e [301; 400] mas valor terá de ir para o intervalo mais próximo da variável linguística, portanto analisando o valor de S pode-se ver que é 8 e portanto equivale ao valor linguístico H2 isto quer dizer que o valor 320 irá para o intervalo mais próximo de H2 ([701 ; 800]), ou seja será o intervalo [301; 400] o que irá equivaler à variável linguística do RPN de L4 (Low 4) pelo que a regra irá ficar:

IF Severidade is H2 (8) and Ocorrência is L (4) and Detetabilidade is VH (10) then RPN is L4 (320).

- Caso nº3, equação 10

$$RPN = S \times O \times D = 1 \times 8 \times 8 = 64 \quad (10)$$

Para este caso acontece o oposto do caso nº2 pois o produto calculado é 64 que poderá estar tanto no intervalo [26; 100] como [63; 150] mas neste caso o valor da severidade é 1 que corresponde à sigla da VL1 da severidade como demonstrado na tabela 8, e, portanto, o intervalo em que o 64 irá encaixar-se no intervalo [26; 100] pois

este encontra-se mais próximo/coincide com VL1 da severidade, pelo que o valor linguístico para o RPN será VL2 pelo que a regra ficará do seguinte formato:

IF Severidade is VL1 (1) and Ocorrência is H (8) and Detetabilidade is H (8) then RPN is VL2 (64).

A criação das regras desta maneira permite depois ao FIS do método Mamdani decidir qual o valor final do RPN tendo em conta a severidade como variável de decisão principal além de criar um peso maior à severidade, pois na maioria dos casos os valores calculados quando pertencem a dois intervalos distintos acabam por ir para o intervalo mais elevado.

Com as regras criadas, é preciso passar para o *software* do *fuzzy logic*, onde se considerou as variáveis S, O e D como *Inputs* do sistema Mamdani, e a o RPN como o output como indicado na figura 14.

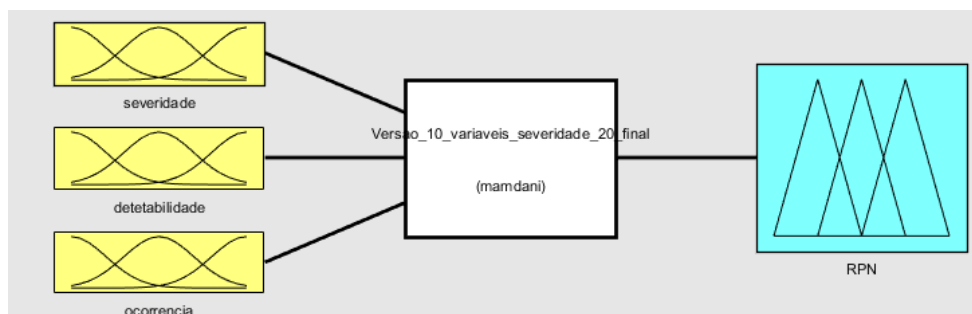


Figura 14 -Variáveis input e output no *fuzzy logic* método 1

Na formulação das variáveis de input quanto de output é necessário a criação dos gráficos que foram divididos pelos mesmos valores linguísticos utilizados anteriormente, isto implica que a severidade tenha 10 áreas, a ocorrência e detetabilidade 5 e o valor de saída do RPN 20, em que cada uma foram distribuídas o mais uniforme possível, como apresentado na figura 15,16, 17 e 18, para evitar ao máximo a repetição de valores.

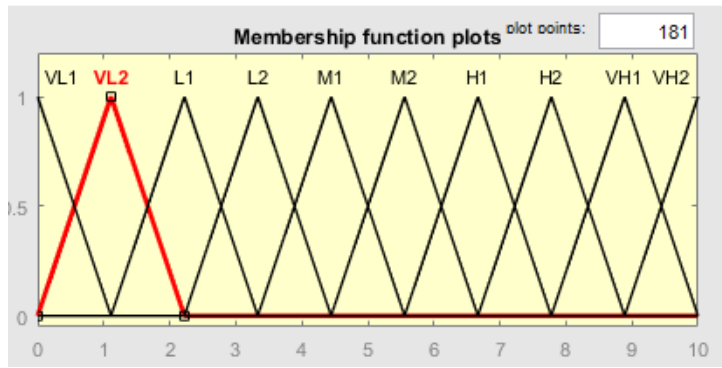


Figura 15 - Input da severidade método 1

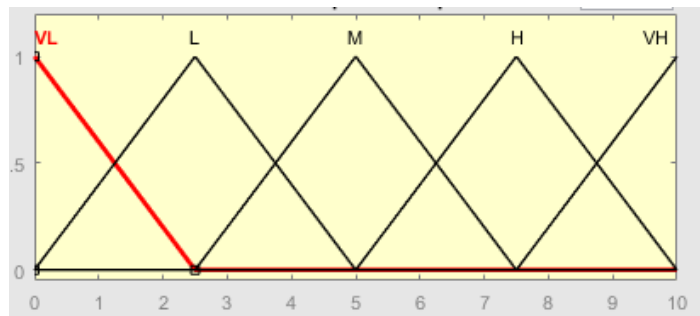


Figura 16 - Input Ocorrência método 1

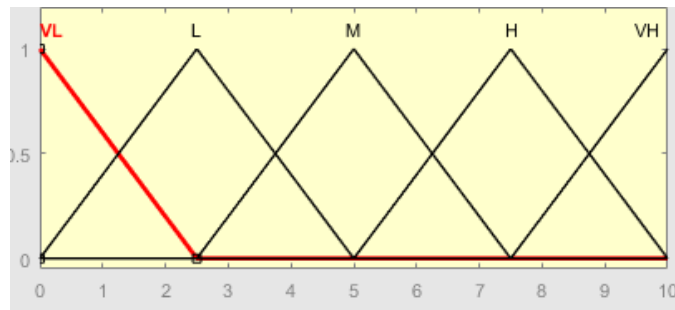


Figura 17 - Input Detetabilidade método 1

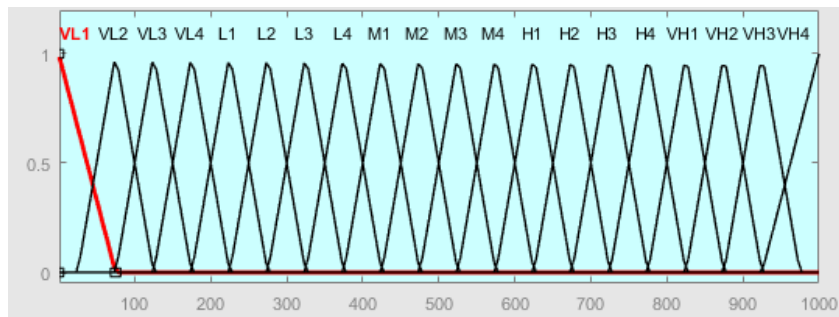


Figura 18 - Output RPN método1

Após a criação das variáveis *input* e *output* foram introduzidas as regras anteriormente criadas, obtidas através dos cálculos efetuados e posteriormente definidas em valores linguísticos. No total foram realizadas 250 regras distintas, que são possíveis ver em anexo e na figura 19 um exemplo de como foram aplicadas no FIS do *fuzzy logic*.

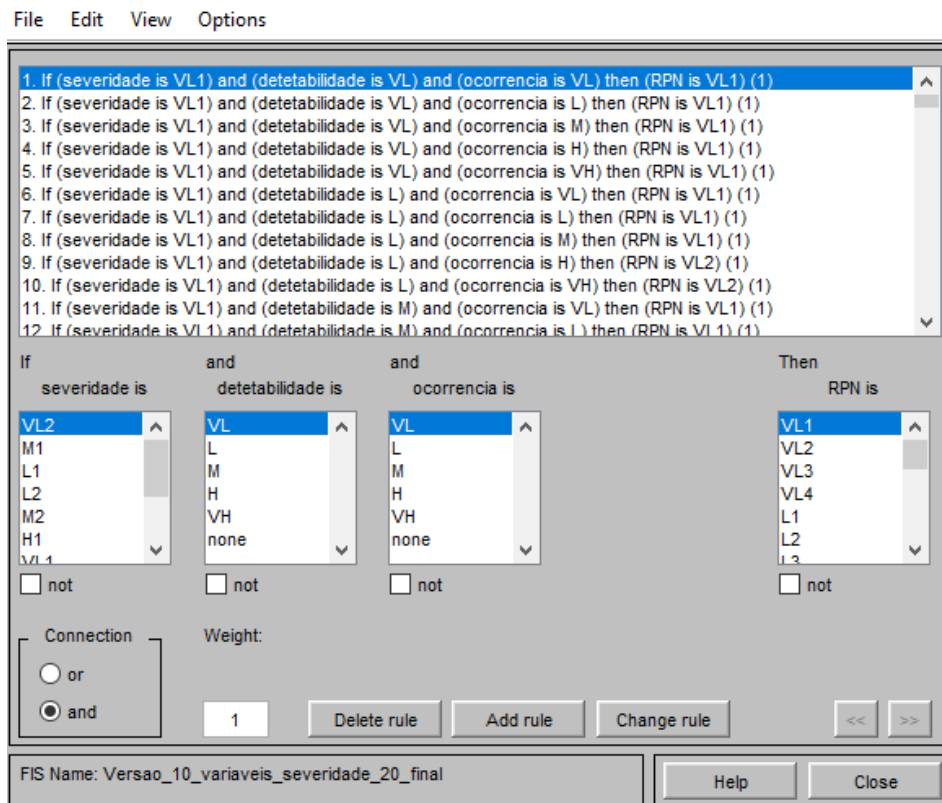


Figura 19- Introdução das regras no FIS no método 1

É possível fazer uma análise graficamente e retirar o valor do RPN a partir da figura 20, este método é útil para quando o poder de computação é mais exigente. Infelizmente o programa apenas deixa visualizar como é que duas variáveis influenciam o RPN. Apesar de não ser útil a nível prático acaba por ajudar a tirar conclusões que podem ser benéficas na construção de novos modelos.

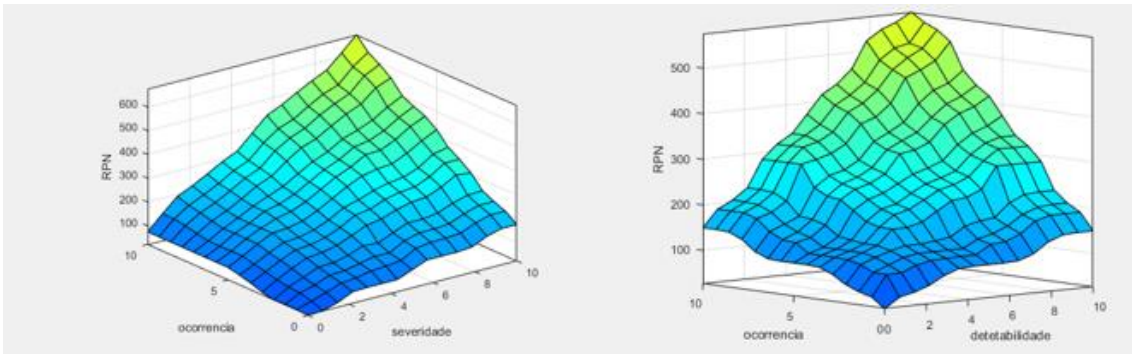


Figura 20- a) Evolução do RPN em função da ocorrência e severidade b) Evolução do RPN em função da ocorrência e detetabilidade

Com o modelo realizado, utilizou-se o *simulink* para obter os valores do RPN, optou-se por utilizar o *simulink* pois oferece uma forma mais prática de conseguir calcular o RPN do que se fosse a partir da função que o sistema *fuzzy* do matlab fornece, pois acaba por ser mais intuitiva como se pode observar na figura 21, pois está identificado as variáveis e é só proceder ao cálculo do RPN através da colocação dos valores nos blocos que estão identificados, e que irá passar por um bloco que contém o sistema *fuzzy logic* criado neste método.

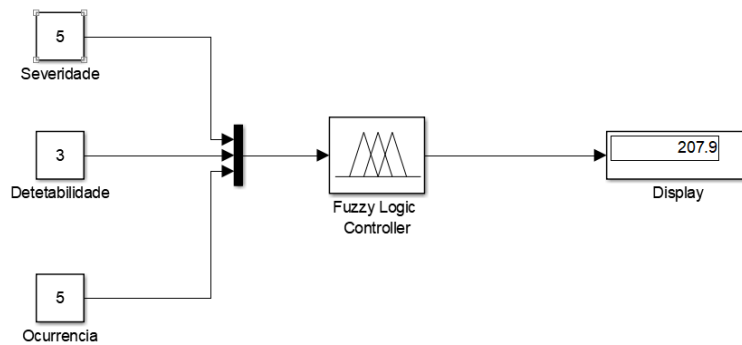


Figura 21- Simulação do método 1 do fuzzy em simulink

Com este método a ideia foi obter um valor de RPN em que o fator S tivesse uma maior importância comparado com os as variáveis O e D. Com S sendo uma variável com peso diferente, é possível reduzir os valores de uma possível duplicação do RPN como é o caso seguinte da tabela 11.

Tabela 11 - Verificação de não duplicação do RPN no método 1

S	O	D	RPN
4	3	5	167
3	4	5	154

Mas ao este método não consegue evitar todos os casos de duplicação pois, D e O apresentam o mesmo peso pelo que para os mesmos valores é possível obter o mesmo valor RPN como se observa na tabela 12.

Tabela 12 - Verificação da duplicação do RPN no método 1

S	O	D	RPN
4	3	5	167
4	5	3	154

Mas a proposta principal de conseguir identificar o valor de S como peso de maior importância cumpre como é o caso de alguns exemplos apresentados na tabela 13.

Tabela 13 - Verificação da maior importância da severidade no método 1

S	O	D	RPN
8	6	6	452
6	6	8	437
7	4	4	256
4	7	4	217

Pelos valores escolhidos é possível verificar que quando o valor é superior na variável S o RPN será superior, pelo que demonstra a superioridade do peso de S.

Apesar de na maioria dos casos a variável S apresentar um peso superior, existe algumas exceções em que isso não acontece. É possível ver nas tabelas 14 e 15 na equação nº 2 que o valor do RPN deveria ser superior quando a S é 5, mas não é o que acontece pelo que demonstra uma lacuna que este método apresenta.

Tabela 14 - Variação dos valores da severidade no método 1

Nº Equação	S	O	D	RPN
1	1	5	5	118
2	2	5	5	163
3	3	5	5	175
4	4	5	5	204
5	5	5	5	250
6	6	5	5	296
7	7	5	5	325
8	8	5	5	337
9	9	5	5	382
10	10	5	5	425

Tabela 15 - Variação dos valores da detetabilidade no método 1

Nº Equação	S	O	D	RPN
1	5	5	1	122
2	5	5	2	142
3	5	5	3	208
4	5	5	4	228
5	5	5	5	250
6	5	5	6	272
7	5	5	7	287
8	5	5	8	328
9	5	5	9	351
10	5	5	10	375

No gráfico da figura 22 é visível essa lacuna no método pois existe uma intercessão nos gráficos que não era suposto acontecer antes de atingir a equação nº 5. Isto acontece, pois, pode ser uma falha na lógica criada ou simplesmente um erro de introdução das regras no *fuzzy* do Matlab.

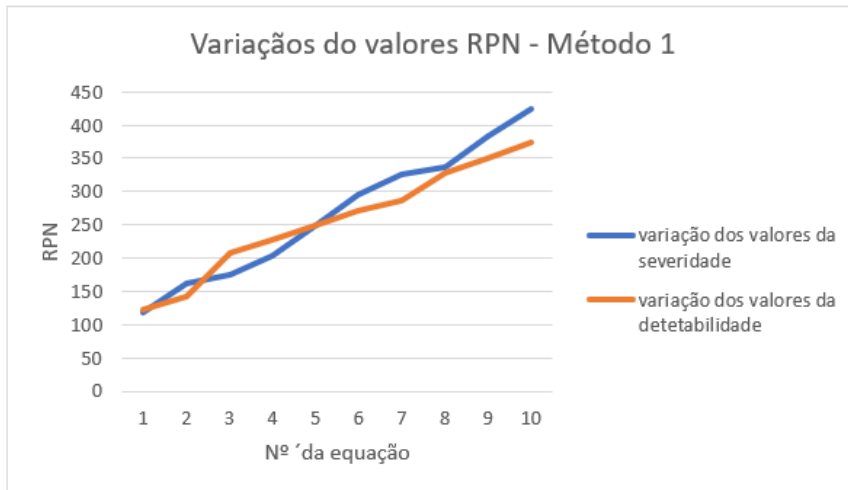


Figura 22 - Variação dos valores do RPN - Método 1

3.2 Método 2

O método que se segue tem como objetivo fazer a alteração dos pesos da S, O e D. Diferente do método 1 em que a O e D tinham o mesmo peso e simplesmente S é que possuía um peso diferente em relação a essas duas variáveis, neste método o que se pretende é fazer com que as três variáveis tenham pesos diferentes entre si, ou seja, que nenhuma das variáveis tenham a mesma importância. A ideia no final é obter os pesos de maneira que S seja superior a O, e O seja superior a D:

$$S > O > D$$

Os pesos serem assim definidos deve se facto de que na maioria dos casos tanto na indústria como na literatura assumirem esta hierarquia.

Para este método foi utilizado dois *fuzzy logic* distintivos, pois cada um vai ter um papel diferente.

3.2.1 Primeiro sistema fuzzy

Começando pelo primeiro conjunto *fuzzy*, utilizou-se as variáveis O e D como inputs do sistema e o output a ser retirado é como se fosse a multiplicação entre O e D (OxD). Este primeiro conjunto servirá para conseguir identificar a variável O com um peso maior que D, e, portanto, o primeiro passo é criar as regras para colocar no FIS.

O processo é semelhante ao já utilizado no método 1, ou seja, é preciso identificar as variáveis linguísticas para cada conjunto de valores. No caso da variável D utilizou-se os valores linguísticos que já estão definidos na tabela 7, ou seja, foi dividido em 5 valores linguísticos, no caso da O foi dividido em 10 valores linguísticos como se pode ver na tabela 16.

Tabela 16 - Valores linguísticos da ocorrência para o método 2

Ocorrência		
1	Pouco provável 1	VL1
2	Pouco Provável 2	VL2
3	Improvável 1	L1
4	Improvável 2	L2
5	Mediano 1	M1
6	Meridiano 2	M2
7	Provável 1	H1
8	Provável 2	H2
9	Muito provável 1	VH1
10	Muito provável 2	VH2

A divisão foi feita deste modo pois como já explicado no caso da severidade do método 1, assim é possível obter uma maior sensibilidade quando o valor é alterado, pelo que a probabilidade de o valor do *output* ser o mesmo acaba por ser mais baixa. Para a criação dos valores linguísticos do output OxD foi dividido por 20 intervalos, que diferente dos 20 intervalos do *output* do RPN em que foi de 1 a 1000 neste caso será de 0 a 100 como está na tabela 17 pois são só duas variáveis que estão no conjunto *fuzzy*, cujo o produto máximo é 100.

Tabela 17 - Variáveis linguísticas para o produto OxD

Produto OxD		
Intervalo	Valor linguístico	Sigla
[1; 5]	Very Low 1	VL1
[3; 10]	Very Low 2	VL2
[7; 15]	Very Low 3	VL3
[11; 20]	Very Low 4	VL4
[16; 25]	Low 1	L1
[21; 30]	Low 2	L2
[26; 35]	Low 3	L3
[31; 40]	Low 4	L4
[36; 45]	Medium 1	M1
[41; 50]	Medium 2	M2
[46; 55]	Medium 3	M3
[51; 60]	Medium 4	M4
[56; 65]	High 1	H1
[61; 70]	High 2	H2
[66 ; 75]	High 3	H3
[71; 80]	High 4	H4
[76; 85]	Very High 1	VH1
[81; 90]	Very High 2	VH2
[86; 95]	Very High 3	VH3
[91; 100]	Very High 4	VH4

A realização destes intervalos foi obtida através da divisão do valor máximo do produto entre as variáveis O e D (100) pelo número de áreas que iriam ser criadas (20) como indicado na equação 11.

$$x = \frac{100 \text{ (Valor máximo do produto OD)}}{20 \text{ (Nº de áreas criado)}} = 5 \quad (11)$$

Ou seja, o valor obtido de 5 indica que cada valor final de cada intervalo irá de 5 em 5 até obter o 100. Já o início de cada intervalo é obtido através da média do intervalo anterior, como segue o exemplo seguinte na equação 12:

$$x = \frac{7 + 15}{2} = 11 \quad (12)$$

Ou seja, o intervalo [11; 20] será o intervalo a seguir ao [7; 15] pois o valor final do intervalo é espaçado de 5 em 5 enquanto o início de cada intervalo é calculado pela média do intervalo anterior como é demonstrado na equação 9.

Com os intervalos calculados e definidos, é preciso passar para o próximo passo, que é a construção das regras propriamente ditas. Isto é passar de valores numéricos para os valores linguísticos para se definir as regras, que ficarão com o seguinte formato:

- **IF** Ocorrência **is** X **and** Detetabilidade **is** Y **then** OxD **is** Z – Frase que se aparece no *fuzzy logic* do matlab.
- **Se** Ocorrência **é** X **e** Detetabilidade **é** Y **então** OxD **é** Z.

O número de regras para este caso é de 50 pois é o número de combinações possíveis entre as variáveis O e D, porque os valores que irão multiplicar do O serão todos os valores inteiros de 1 a 10 enquanto os da variável D serão os valores máximos de cada intervalo ou seja os números pares que existem de 1 a 10. É possível visualizar na tabela 18 alguns dos exemplos das multiplicações efetuadas.

Tabela 18- Exemplo dos valores multiplicados no conjunto do primeiro fuzzy no método 2

Ocorrência	Detetabilidade	Produto
2	2	4
2	4	8
2	6	12
2	8	16
2	10	20
7	2	14
7	4	28
7	6	42
7	8	56
7	10	70

O passo seguinte é a criação da tabela que vai auxiliar a tomada de decisão na construção das regras. A tabela 19 foi construída a partir da junção da tabela 17 do *output* OxD e da tabela 16 da variável O. A tabela 19 apresenta os valores linguísticos do *output* OxD e da variável *input* O. A variável O é que auxiliará para saber em que intervalo cada regra se irá encaixar para obter o valor linguístico do produto OxD correto. A lógica aqui apresentada é a mesma já usada no método 1 em que era a partir da variável S que permitia saber em que intervalo pertencia quando o valor apresentava-se em dois intervalos.

Tabela 19 - Combinação das variáveis linguística severidade com as do Produto OxD

Produto OxD			
Intervalo	Valor linguístico	Sigla Produto OxD	Sigla Ocorrência
[1; 5]	Very Low 1	VL1	
[3; 10]	Very Low 2	VL2	VL1
[7; 15]	Very Low 3	VL3	
[11; 20]	Very Low 4	VL4	VL2
[16; 25]	Low 1	L1	
[21; 30]	Low 2	L2	L1
[26; 35]	Low 3	L3	
[31; 40]	Low 4	L4	L2
[36; 45]	Medium 1	M1	
[41; 50]	Medium 2	M2	M1
[46; 55]	Medium 3	M3	
[51; 60]	Medium 4	M4	M2
[55; 65]	High 1	H1	
[61; 70]	High 2	H2	H1
[66; 75]	High 3	H3	
[71; 80]	High 4	H4	H2
[76; 85]	Very High 1	VH1	
[81; 90]	Very High 2	VH2	VH1
[86; 95]	Very High 3	VH3	
[91; 100]	Very High 4	VH4	VH2

A par do método 1 existirá três casos possíveis que poderão acontecer. O primeiro caso será o mais simples, que é quando o valor de uma das combinações está dentro de um só intervalo pelo que a escolha do valor linguístico será uma escolha óbvia como é o caso do exemplo da equação 13:

- Caso nº 1, equação 13

$$OD = O \times D = 1 \times 2 = 2 \quad (13)$$

Um dos exemplos mais simples, pois, o único intervalo disponível será o intervalo [1; 5[, mais nenhum intervalo contém o valor 2. Dessa forma a variável linguística escolhida para o produto OxD será *Very Low 1* (VL1). Portanto a regra ficará com a seguinte forma:

IF Ocorrência **is** VL2 (2) **and** Detetabilidade **is** L (4) **then** OxD **is** VL2 (8).

O segundo e o terceiro caso são os mais críticos pois é quando o valor da multiplicação se encontra em dois intervalos diferentes. Nestes casos observa-se a tabela X, e escolhe-se o intervalo linguístico do produto OxD que estiver mais próximo do valor linguístico de O usado no cálculo.

- Caso nº 2, equação 14

$$OD = O \times D = 6 \times 6 = 36 \quad (14)$$

O valor neste exemplo é 30 e ao analisar é possível observar que pode pertencer ao intervalo e intervalo [31; 40[e ao [36 ; 45[. Mas pela regra irá para o intervalo [36 ; 45[pois é o intervalo mais próximo da variável linguística O que neste caso é M2 (6), ou seja, o valor linguístico de OxD para este caso será Medium 1 (M1). A regra ficará com o seguinte formato:

IF Ocorrência **is** M2 (6) **and** Detetabilidade **is** M (6) **then** OxD **is** M1 (36).

- Caso nº 3, equação 15

$$OD = O \times D = 8 \times 10 = 80 \quad (15)$$

Aqui neste caso é proceder como no caso 2 em que o valor está inserido em dois intervalos, o valor 80 tanto pode estar no intervalo [71 ; 80] quanto no intervalo [76 ; 85], mas olhando para o valor da variável O que é 8 e portanto a sua variável linguística é *High 2* (H2) pode-se observar que o intervalo em que este 80 vai entrar é o [71 ; 80] pois este intervalo é o que se encontra mais próximo de H2, e por isso a variável linguística para OxD será High 4 (H4). A regra neste caso será:

IF Ocorrência **is** M2 (8) **and** Detetabilidade **is** VH (10) **then** OxD **is** H4 (80).

Após definido as 50 regras é necessário criar os *inputs* e o *output* no *software* Matlab, como está indicado na imagem 23, sendo os *inputs* a variável O e D, e o *output* como os valores do seu produto OxD.

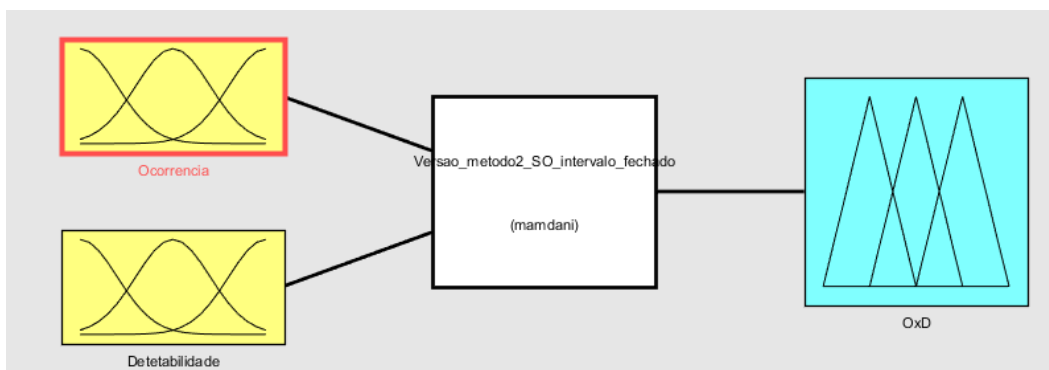


Figura 23 - Introdução das variáveis output e input no método 2

Como definido no início do método 2 a variável O é dividida em 10 áreas, a variável D em 5 e valores do produto OxD em 20, sendo que as áreas foram distribuídas de maneira o mais uniforme possível, para dessa maneira conseguisse evitar valores repetidos no *output* final.

A variável O é dividida em 10 áreas no intervalo de 0 a 10, a variável D em 5 áreas de 0 a 10 e o produto dos valores OxD em 20 áreas distribuídos pelo intervalo de 1 a 100. A distribuição foi realizada em áreas triangulares como se observa na figura 24,

25 e 26, em que cada gráfico em triângulo terá o nome de uma variável linguística que será usada quando for para inserir as regras.

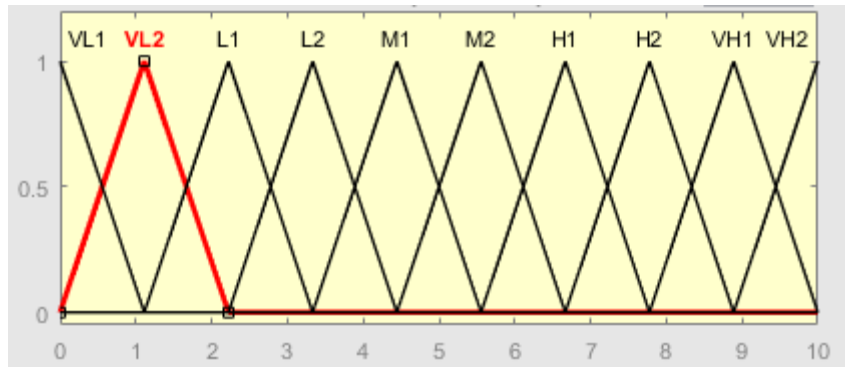


Figura 24 - Variável input ocorrência método 2

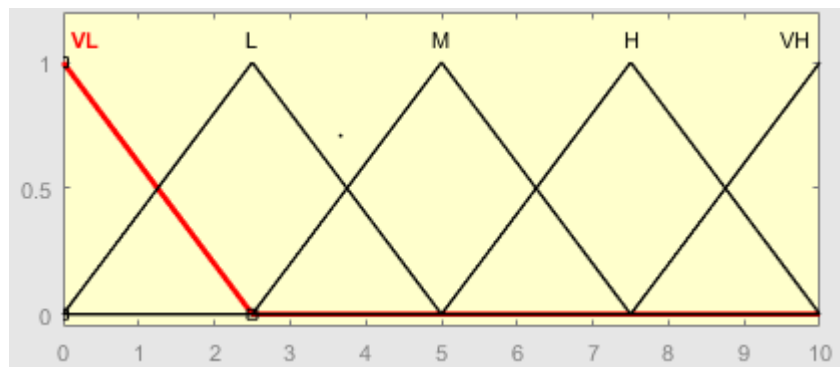


Figura 25 – Variável input detetabilidade método 2

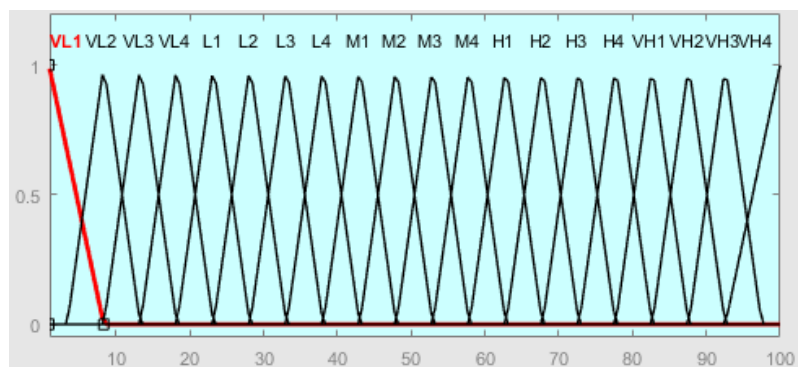


Figura 26 - Variável output produto OxD

Os valores do output estão definidos no intervalo de 1 a 100 pois após ocorrer a “defuzzified” a partir do método do centroide os valores que se obtém tem de estar nesse intervalo.

Com o input e *output* criados é necessário proceder à colocação das regras no FIS como se observa na figura 27, em que terá o formato demonstrados nos exemplos. Foi aqui que se adicionou as 50 regras geradas. É a partir destas regras que se dá ao *fuzzy logic* um pensamento mais “humano”, em vez do tradicional verdadeiro e falso, 1 ou 0.

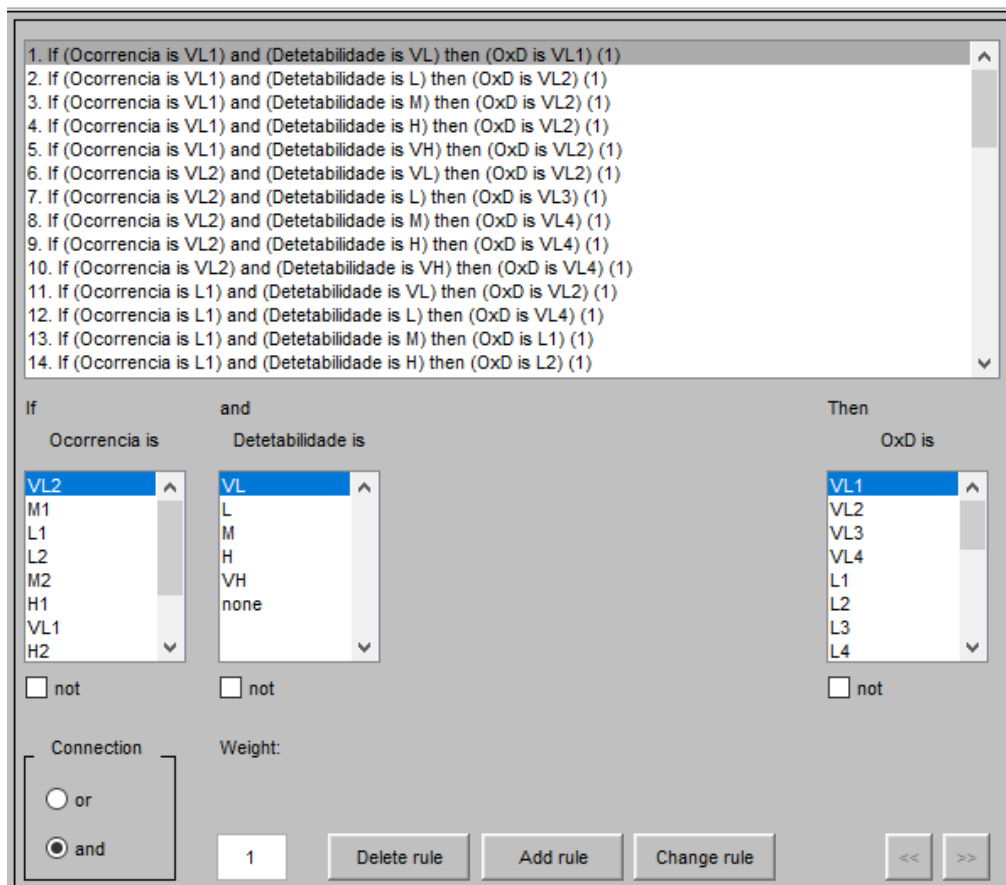


Figura 27 – Introdução das regras FIS do método 2 para obtenção variável OxD

Após o sistema *fuzzy logic* estar todo definido foi criado um conjunto de blocos no *simulink* para proceder à sua utilização para tornar mais fácil a sua leitura e introdução de dados como demonstrado na figura 28. Esta primeira etapa serviu para criar a distinção de pesos entre a variável O e D, e para retirar um valor que será usado no próximo sistema *fuzzy*.

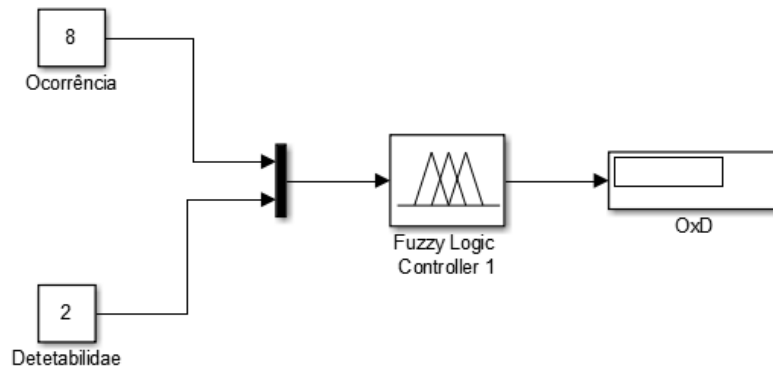


Figura 28 - Simulação do primeiro sistema *fuzzy* do método 2 em *simulink*

3.2.2 Segundo sistema *fuzzy logic*

O segundo sistema *fuzzy* será realizado com o valor que será obtido do valor do sistema *fuzzy* anterior e com o valor da variável S. Em termos práticos o valor que sair do cálculo do *fuzzy logic* anterior será o usado no novo *input* que vai ser criado que será o *output* criado do sistema anterior, ou seja, o OxD. A variável S será também um *input* e o *output* final será o valor ao qual se pretende chegar, o RPN, como é demonstrado na figura 29.

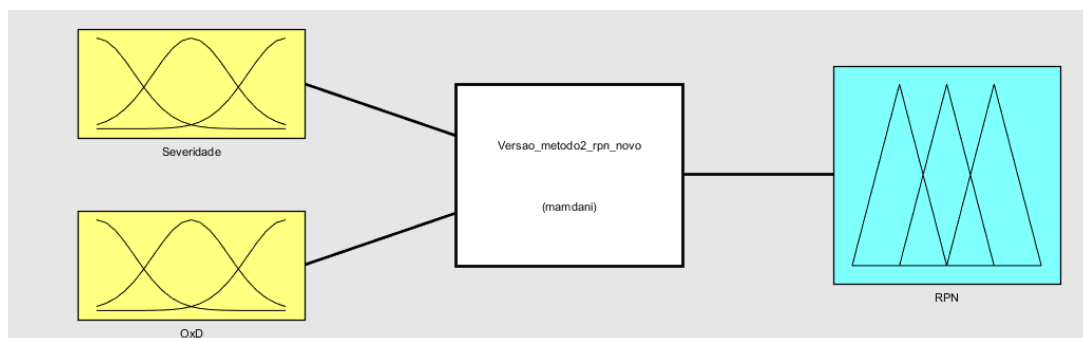


Figura 29 - Introdução das variáveis inputs S e OxD e output RPN

Os valores linguísticos para S são os que estão definidos na tabela 5 pelo que terão 10 intervalos que definirão os valores linguísticos.

A variável OxD terá 5 áreas como demonstrado na tabela 20, em que a obtenção da mesma foi originada pela mesma lógica já usadas para outras tabelas como é o caso da tabela 17. Pelo que temos o cálculo na equação 16 do qual os o valor final de cada intervalo será espaçado:

$$x = \frac{100 \text{ (Valor máximo do produto OxD)}}{5 \text{ (Nº de areas criadas)}} = 20 \quad (16)$$

E o início de cada intervalo será a média aproximada do valor do intervalo anterior, como é dado no exemplo na equação 17:

$$x = \frac{1 + 20}{2} = 11 \quad (17)$$

Com a junção das duas equações é possível perceber que o intervalo [11;40] vai suceder ao intervalo [1;20].

Tabela 20 - Variáveis Linguísticas da severidade para o método 2

OxD		
[1;20]	Muito fraco	VL
[11;40]	Fraco	L
[26;60]	Mediano	M
[43;80]	Forte	H
[62;100]	Muito Forte	VH

Por sua vez a variável *output* do RPN terá a seguinte tabela 10, já calculada anteriormente, ou seja, o *output* RPN terá 20 valores linguísticos.

Novamente com o auxílio da tabela 19, procede-se aos cálculos das combinações entre S e OxD para descobrir qual o valor linguístico do RPN a ser usado nas regras. Como a variável S tem 10 valores linguísticos, o cálculo será feito com todos os valores inteiros de 1 a 10, enquanto a variável OxD como tem 5 variáveis linguísticas, os valores usados serão o máximo de cada intervalo que neste caso serão os valores 20, 40, 60, 80 e 100. Pelo que se obterá 50 combinações possíveis que originaram as 50 regras que serão usadas neste segundo conjunto *fuzzy*, sendo alguns exemplos apresentados na tabela 21.

Tabela 21 - Exemplo de multiplicação entre as variáveis S e OxD

S	OxD	RPN
1	20	20
2	40	80
3	60	180
8	80	640
9	100	900

Para a criação das regras será da mesma forma que os outros passos já efetuados pelo que será apresentado apenas um exemplo para esta situação no qual se pode observar na equação 18:

- Caso nº1, equação 18

$$RPN = S \times OxD = 8 \times 80 = 640 \quad (18)$$

Observando a tabela 19 valor 640 está inserido no intervalo [551;650] e [601;700] que correspondem às variáveis linguísticas do RPN H1 e H2 respetivamente, mas olhando para o a variável linguística da severidade pode-se ver que é o H2, portanto o intervalo a escolher para o valor linguístico do RPN será o que se aproxima mais do valor da linguísticos da severidade, ou seja, o intervalo [601;700] que corresponde a H2 e, portanto, a regra ficará da seguinte maneira:

IF Severidade is H2 (8) and OxD is H (80) then OxD is H2 (640).

Fazendo o mesmo procedimento para os restantes cálculos obtém-se as 50 regras que serão colocadas no FIS como é apresentado na figura 30.

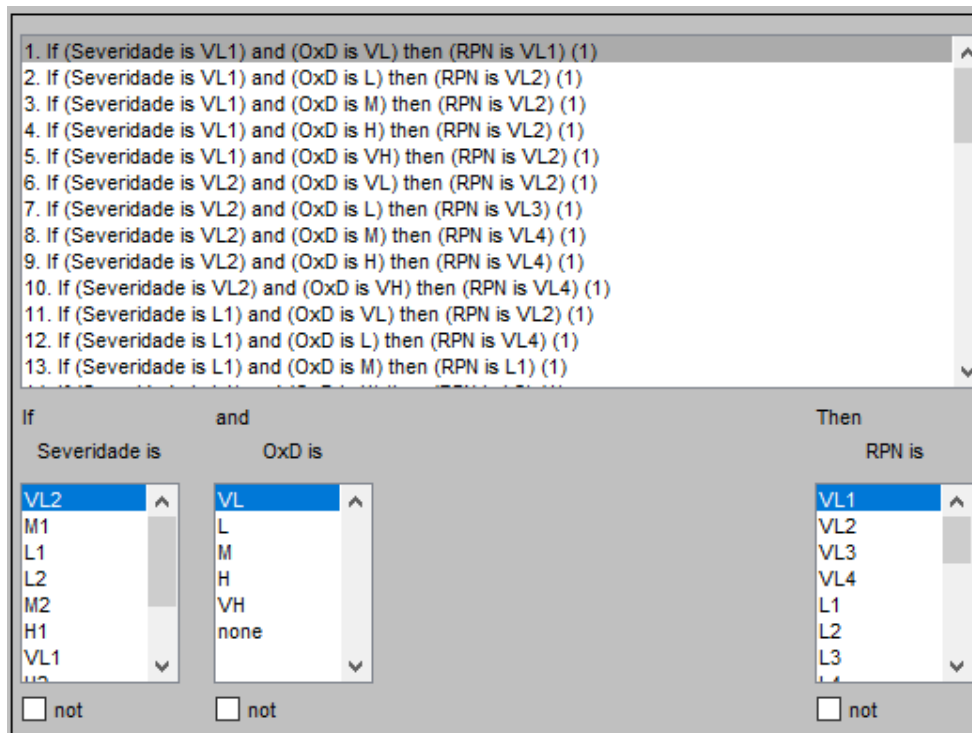


Figura 30 - Introdução das regras FIS do método 2 para obtenção do valor RPN

O número de gráficos criados para os valores *inputs* S e OxD estão divididas em 10 e 5 áreas respectivamente, enquanto o *output* RPN em 20, pela mesma lógica anteriormente explicadas nos dois últimos conjuntos *fuzzy*. Vale lembrar que cada gráfico corresponde ao valor linguístico da sua variável, como é de notar nas figuras 31, 32 e 33.

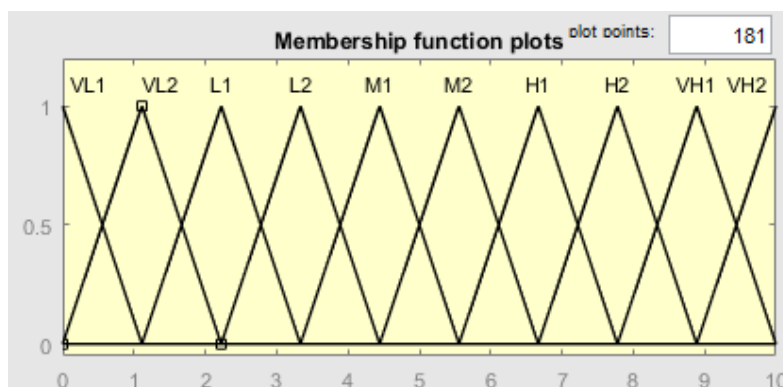


Figura 31 - Variável input severidade

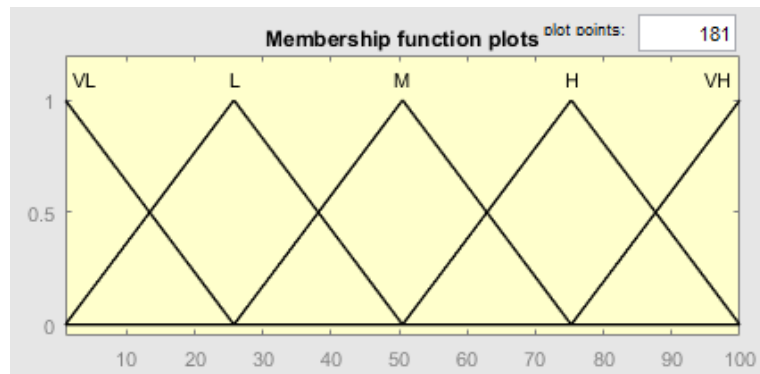


Figura 32 - Variável input OxD

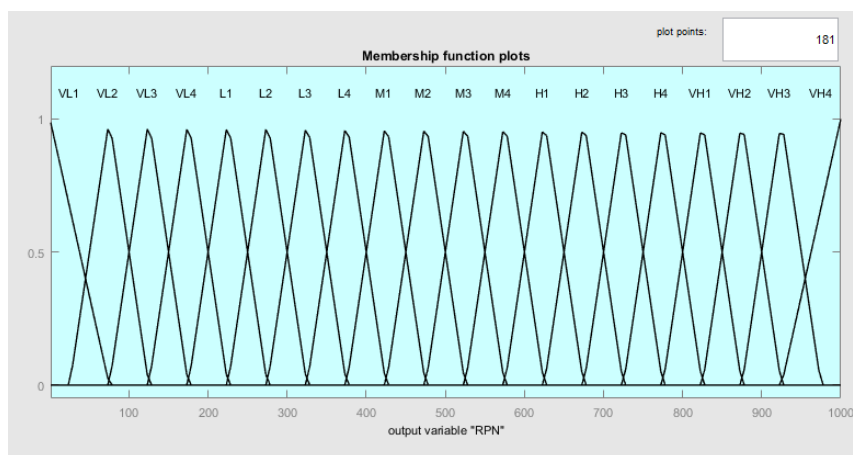


Figura 33 - Valor output RPN método 2

Após finalizado o segundo sistema *fuzzy logic* adicionou-se mais um bloco para a variável S, mais um bloco *fuzzy logic controller*, onde está inserido o ficheiro deste segundo sistema criado e um visor onde irá aparecer o valor do RPN como está na figura 34. Com a construção de blocos no *simulink* é mais fácil fazer não só o cálculo do valor do RPN como permite verificar a importância de cada peso, pois permite verificar simultaneamente o valor de OxD e também do RPN e conseguir tirar conclusões.

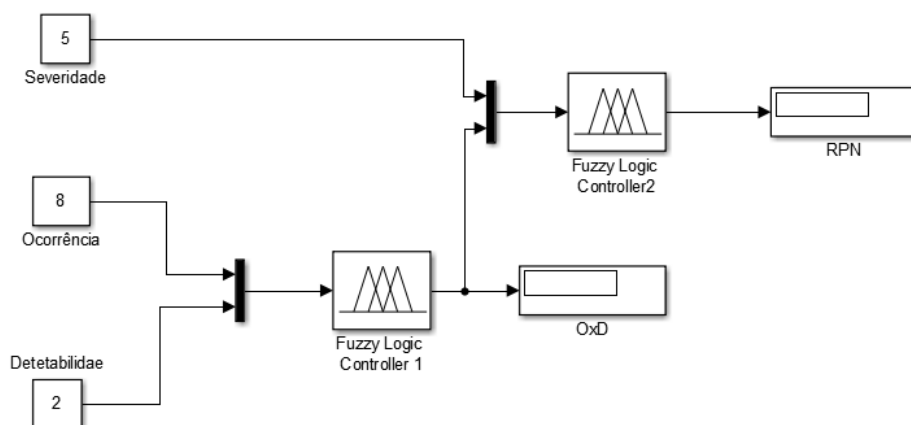


Figura 34 - Método 2 adaptado em Simulink

A partir deste método 2 é possível dar diferentes pesos para cada variável o que permite anular a duplicação do RPN, isto acontece, pois, cada peso é diferente e a probabilidade de haver um valor de RPN igual é mínimo. Apesar de apresentar diferentes pesos este método não permite fazer a sua alteração de maneira voluntária, pelo que pode tornar a ser algo que limite a sua utilização de uma forma geral. Tendo como base o exemplo da tabela 22 é possível verificar a ordem dos pesos de cada variável, em que neste método é $S > O > D$.

Tabela 22 – Exemplos da aplicação prática do método 2

S	O	D	OxD	RPN	Priorização
6	4	4	28,8	331	1º
4	4	6	35,3	268	3º
4	6	4	38,5	276	2º
5	2	2	15,5	204	1º
2	2	5	22	150	3º
2	5	2	22,8	153	2º

De forma resumida, a lógica por trás da obtenção dos pesos foi obtida através de dois sistemas *Fuzzy Logic*, que permitiram inserir duas variáveis à entrada, e a partir do número de valores linguísticos e das regras geradas foi possível dar o peso superior à variável pretendida. Ao colocar mais valores linguísticos a uma das variáveis permitia criar uma maior sensibilidade a essa mesma variável, enquanto o objetivo das regras foi

criar intervalos diferentes em que o valor calculado na maioria dos casos tivesse em dois intervalos em simultâneo, e quando possível escolher o intervalo mais elevado sempre tendo em conta a variável que se pretendia obter um maior peso.

4 Validação dos modelos propostos

A validação dos modelos é a parte em que se verifica a veracidade dos modelos propostos enquanto ferramenta de estudo/trabalho a partir de análises de os estudos/modelos já realizados.

Este primeiro caso de estudo tinha o objetivo de evitar falhas fornecendo manutenção, modificações e soluções de integridade de ativos numa unidade de refinaria, e propuseram um novo método de quantificação de risco onde se basearam no *fuzzy* do FMEA, onde analisaram os parâmetros de entrada das variáveis S, O e D, para combater as desvantagens que o RPN convencional possui como é o caso que se segue onde é possível analisar uma dessas desvantagens. A tabela 23 apresenta três modos de falha que que ao usar o RPN tradicional apresenta o mesmo RPN não sendo possível identificar o modo de falha que apresenta um maior risco. [47].

Tabela 23 - Comparação do Método 1 e 2 com o primeiro caso de estudo [47]

	S	O	D	RPN	RPN caso de estudo 1	Método 1	Método 2
Paragem da Bomba de alimentação devido a um shutdown	8	2	5	80	464 (1°)	210 (1°)	309 (2°)
Incrustações e entupimentos n permutador de calor causam a diminuição da temperatura	2	5	8	80	86,7 (3°)	175 (3°)	148 (3°)
Problemas de operação, a gasolina na água causa poluição ambiental	5	8	2	80	214 (2°)	207 (2°)	428 (1°)

É possível observar na tabela 22, que tanto o método 1 quanto o método 2 conseguem atingir valores de RPN diferentes para cada modo de falha conseguindo fazer a sua priorização. É de notar que que o método 1 e método 2 apresentam valores de RPN diferentes que vão originar uma priorização distinta para cada um dos métodos. O método 1 apesar de apresentar a mesma priorização que o método do caso em estudo apresenta uma vulnerabilidade que se deve ao facto de modo de falha que está em 1° e 2° apresentarem valores de RPN próximos, o que por vezes não ajuda na tomada de

decisão, pois dependendo da equipa que faz a análise pode criar a dúvida de se realmente os modos de falha estão bem priorizados.

O segundo caso será para verificar vários modos de falha e fazer a sua priorização e comparar com diferentes métodos propostos para tentar os problemas que o RPN possui. O caso de estudo em questão tem como objetivo a criação de um método que pudesse combater as desvantagens do RPN através da função *risk isosurface function* que prioriza 3 variáveis de risco considerando a sua ordem de importância em um determinado cenário de risco, e uma função índice de priorização de risco que prioriza 3 variáveis de risco considerando os seus pesos, que foi depois correlacionado com outros modelos de priorização de riscos, como se pode observar na tabela 25 [29].

A tabela 24 contém os valores dos RPN calculados para o método tradicional e os modelos propostos deste trabalho.

Tabela 24 – Valores do RPN tradicional, Método 1 e 2 no segundo caso de estudo [29].

Modo de Falha	S	O	D	RPN tradicional	RPN Método 1	RPN Método 2
FM1	7	6	3	126	297	411
FM2	6	6	5	180	319	398
FM3	7	5	7	245	380	480
FM4	7	5	3	105	253	388
FM5	5	3	6	90	229	295
FM6	10	1	8	80	308	343
FM7	8	2	5	80	210	355
FM8	8	6	5	240	383	490
FM9	7	4	4	112	256	378
FM10	8	4	7	224	364	464
FM11	7	4	4	112	256	378

Tabela 25 - Ordenação dos modos de falha por ordem decrescente [29]

Modo de Falha	S	O	D	RPN tradicional	Fuzzy VIKOR	ITHWD	RPI (Sc4)	RPI (Sc5)	RPN Método 1	RPN Método 2
FM1	7	6	3	5	4	4	4	5	6	4
FM2	6	6	5	4	7	6	5	7	4	5
FM3	7	5	7	1	2	1	2	4	2	2
FM4	7	5	3	8	8	10	7	9	9	6
FM5	5	3	6	9	11	11	11	11	10	11
FM6	10	1	8	10	1	3	6	3	5	10
FM7	8	2	5	10	6	9	9	6	11	9
FM8	8	6	5	2	5	5	1	1	1	1
FM9	7	4	4	6	10	7	8	8	7/8	7/8
FM10	8	4	7	3	3	2	3	2	3	4
FM11	7	4	4	6	9	8	10	10	7/8	7/8

De um modo geral, tanto o método 1 quanto método 2 podem ser aplicados para o cálculo do valor do RPN, apesar de apresentar diferenças com os outros métodos na ordenação da prioridade do modo de falha conseguem manter coerência na ordenação de priorização dos modos de falha, sendo que em alguns casos os modos de falha apresentam a mesma priorização. É de lembrar que cada método é criado para uma análise específica, pelo que no final a priorização será diferente em todos os métodos pois cada um tem um objetivo específico, mas no final todos os métodos aqui apresentados tem um só objetivo em comum que é diminuir ao máximo as desvantagens que o RPN convencional apresenta, melhorando processo seja de equipamentos ou serviços.

5 Conclusão

O trabalho teve como objetivo principal melhorar o RPN de forma a ultrapassar as limitações identificadas na literatura e na indústria. Para realizar essa melhoria foi feito um estudo do FMEA bem como do RPN. O estudo foi realizado devido à importância desta técnica na indústria, em especial na área da manutenção, visto ser esta a área que pode mitigar os problemas que poderiam acontecer no futuro, mas também devido ao prejuízo que as empresas têm devido ao facto de não usarem a manutenção preventiva e apenas atuarem já depois de um possível modo de falha e o acontecimento levar a problemas e prejuízos que poderiam ter sido evitados. O FMEA é uma ferramenta com bastante eficácia, com provas dadas na indústria, que já conta com bastantes alterações efetuadas ao longo dos anos por diversos autores nas mais variadas indústrias, o que mostra que tem muito potencial para ser ainda mais desenvolvida e melhorada das mais diversas maneiras. Foi o caso deste trabalho que teve o cuidado de criar uma forma de obter o RPN onde foi possível realizar a melhoria em alguns pontos fracos que este apresentava nomeadamente na repetição do RPN, onde diferentes valores nas variáveis S, O e D poderiam causar o mesmo valor de RPN, o que causaria o problema de não conseguir decidir qual o caso mais crítico e acabar por escolher um outro que aparentava ser mais problemático e não o ser. Um outro ponto de melhoria foi a aplicação de diferentes pesos às variáveis, e isso foi comprovado tanto pelo método 1 como pelo método 2, sendo que no primeiro método criado apenas a variável severidade teve uma importância maior em relação à ocorrência e detetabilidade, isto é, que o peso da severidade se tornou maior em comparação com O e a D, pois muito autores consideram a severidade como o fator principal a ter em conta numa análise do FMEA e consequentemente no cálculo do RPN. No método 2 foi possível realizar a alteração ao peso das três variáveis, tendo o objetivo dar maior relevância à severidade seguida da ocorrência e por fim detetabilidade.

Foi possível atingir o objetivo pretendido de maneira positiva, pois ao fazer a comparação dos métodos criados neste trabalho com outros métodos por outros autores foi possível verificar a boa performance dos modelos propostos, apesar de como obvio ainda haver falhas em ambos os métodos que poderão ser melhorados.

O objetivo principal foi a modificação dos pesos sem um objetivo próprio, pois a ideia presente durante o trabalho foi a alteração dos mesmos para colmatar as limitações que o FMEA apresenta.

5.1 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros seria interessante a realização da melhoria dos modelos propostos neste trabalho, como identificar uma maneira de alterar os pesos das variáveis de maneira consciente. Era interessante criar com o *fuzzy logic* um modelo que permita dividir as três variáveis existentes em vários parâmetros de maneira que se olhasse para as variáveis de modo menos subjetiva e mais definido.

Não foi possível ao longo do trabalho, mas poderia ter sido utilizado o multicritério para o auxílio no cálculo de um novo RPN.

Uma possível ideia para fazer alteração dos pesos das variáveis era usar as redes neurais, uma vez que é um processo de aprendizagem que à medida que se vai obtendo mais informação a rede vai “aprendendo” e dessa maneira conseguindo valores de pesos que poderão estar mais perto da realidade.

Referências

- [1] M.-A. Filz, J. E. B. Langner, C. Herrmann, e S. Thiede, «Data-driven failure mode and effect analysis (FMEA) to enhance maintenance planning», *Computers in Industry*, vol. 129, p. 103451, ago. 2021, doi: 10.1016/j.compind.2021.103451.
- [2] T. S. G. Gough Michael, *Readings in Risk*. New York: RFF Press, 2013. doi: 10.4324/9781315060590.
- [3] «ISO - ISO 31000 — Gestão de riscos», ISO. Acedido: 19 de outubro de 2023. [Disponível em: <https://www.iso.org/iso-31000-risk-management.html>
- [4] L. Lipol e J. Haq, «Risk analysis method: Fmea/fmeca in the organizations», *International Journal of Basic & Applied Sciences IJBAS-IJENS*, vol. 11, pp. 74–82, jan. 2011.
- [5] M. D. Ramere e O. T. Laseinde, «Optimization of condition-based maintenance strategy prediction for aging automotive industrial equipment using FMEA», *Procedia Computer Science*, vol. 180, pp. 229–238, 2021, doi: 10.1016/j.procs.2021.01.160.
- [6] X. Yang, Y. He, R. Liao, Y. Cai, e W. Dai, «Mission reliability-centered opportunistic maintenance approach for multistate manufacturing systems», *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 241, p. 109693, jan. 2024, doi: 10.1016/j.ress.2023.109693.
- [7] *Maintenance. Maintenance terminology*, Withdrawn. 2010.
- [8] R. Liao, Y. He, J. Zhang, X. Zheng, A. Zhang, e W. Zhang, «Reliability proactive control approach based on product key reliability characteristics in manufacturing process», *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 237, p. 109374, set. 2023, doi: 10.1016/j.ress.2023.109374.
- [9] D. J. Smith, «2 - Understanding terms and jargon», em *Reliability, Maintainability and Risk (Seventh Edition)*, D. J. Smith, Ed., Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005, pp. 11–23. doi: 10.1016/B978-075066694-7/50003-X.
- [10] «Reliability And Quality Are Related - Efficient Plant». Acedido: 13 de dezembro de 2023. Disponível em: <https://www.efficientplantmag.com/2021/02/reliability-and-quality-are-related/>
- [11] S. Guan, B. Wan, J. Zhong, G. Fu, e X. Wang, «A reliability assessment methodology of system-in-package based virtual qualification», *Microelectronics Reliability*, p. 115212, out. 2023, doi: 10.1016/j.microrel.2023.115212.
- [12] J. Alam, H. Zhang, L. A. C. Neves, e D. Dias-da-Costa, «Sequential Bayesian updating for time-variant reliability analysis of ageing structures», *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 204, p. 110774, dez. 2023, doi: 10.1016/j.ymssp.2023.110774.
- [13] V. Gattulli e L. Chiaramonte, «Condition Assessment by Visual Inspection for a Bridge Management System», *Comp-aided Civil Eng*, vol. 20, n.º 2, pp. 95–107, mar. 2005, doi: 10.1111/j.1467-8667.2005.00379.x.
- [14] P. Bertola, «Fashion Within the Big Data Society: How can data enable fashion transition towards a more meaningful and sustainable paradigm?», em *Proceedings of the 14th Biannual Conference of the Italian SIGCHI Chapter*, em CHItaly '21. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, jul. 2021, pp. 1–8. doi: 10.1145/3464385.3468146.

- [15] S. Kashif Ur Rehman, Z. Ibrahim, S. A. Memon, e M. Jameel, «Nondestructive test methods for concrete bridges: A review», *Construction and Building Materials*, vol. 107, pp. 58–86, mar. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.011.
- [16] M. Kušter Marić, A. Mandić Ivanković, A. Vlašić, J. Bleiziffer, M. Srbić, e D. Skokandić, «Assessment of reinforcement corrosion and concrete damage on bridges using non-destructive testing», *Grđevinar*, vol. 71, n.º 10., pp. 843–862, out. 2019, doi: 10.14256/JCE.2724.2019.
- [17] Q. Li, Y. Lin, S. Wang, S. Wang, e X. Zhu, «Storage Reliability Assessment Method for Aerospace Electromagnetic Relay Based on Belief Reliability Theory», *Applied Sciences*, vol. 12, n.º 17, Art. n.º 17, jan. 2022, doi: 10.3390/app12178637.
- [18] D. J. Foley e D. W. Kellner, «Single-shot device reliability challenges», em *2017 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, jan. 2017, pp. 1–4. doi: 10.1109/RAM.2017.7889673.
- [19] Y. Lin, T. He, H. Zhu, Y. Lin, e Q. Chen, «Storage reliability prediction of electromechanical components based on virtual manufacturing and testing», *Heliyon*, vol. 9, n.º 10, p. e20549, out. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e20549.
- [20] A. Salonen, «Strategic Maintenance Development in Manufacturing Industry», 2011. Acedido: 27 de setembro de 2023. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Strategic-Maintenance-Development-in-Manufacturing-Salonen/18942506d5344fdb7fe4008c980f9ff2c1012a02>
- [21] K. M. Groth, A. Al-Douri, M. West, K. Hartmann, G. Saur, e W. Buttner, «Design and requirements of a hydrogen component reliability database (HyCReD)», *International Journal of Hydrogen Energy*, ago. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.07.165.
- [22] «hazard-analysis-instructions.pdf». Acedido: 19 de setembro de 2023. Disponível em: <https://www.mtu.edu/ehs/docs/hazard-analysis-instructions.pdf>
- [23] P. Bu, Y. Li, W. Tang, X. Chen, e B. Li, «Semi-quantitative risk analysis of high concrete face rockfill dams under seismic action», *Structures*, vol. 45, pp. 685–694, nov. 2022, doi: 10.1016/j.istruc.2022.09.013.
- [24] M. Nabawy e L. M. Khodeir, «Achieving efficiency in quantitative risk analysis process – Application on infrastructure projects», *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 12, n.º 2, pp. 2303–2311, jun. 2021, doi: 10.1016/j.asej.2020.07.032.
- [25] S. Dixit, K. Sharma, e S. Singh, «Identifying and Analysing Key Factors Associated with Risks in Construction Projects», em *Emerging Trends in Civil Engineering*, K. G. Babu, H. S. Rao, e Y. Amarnath, Eds., em *Lecture Notes in Civil Engineering*. Singapore: Springer, 2020, pp. 25–32. doi: 10.1007/978-981-15-1404-3_3.
- [26] V. Popovic e B. Vasic, «Review of hazard analysis methods and their basic characteristics», *FME Transactions*, 2008, Acedido: 27 de setembro de 2023. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Review-of-hazard-analysis-methods-and-their-basic-Popovic-Vasic/0e5d961f19d993c9a7877e0e90daa15930c322f0>
- [27] S. Dixit, S. N. Mandal, J. V. Thanikal, e K. Saurabh, «Evolution of studies in construction productivity: A systematic literature review (2006–2017)», *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 10, n.º 3, pp. 555–564, set. 2019, doi: 10.1016/j.asej.2018.10.010.
- [28] Y. Yener e G. F. Can, «A FMEA based novel intuitionistic fuzzy approach proposal: Intuitionistic fuzzy advance MCDM and mathematical modeling integration», *Expert Systems with Applications*, vol. 183, p. 115413, nov. 2021, doi: 10.1016/j.eswa.2021.115413.

- [29] V. Anes, E. Henriques, M. Freitas, e L. Reis, «A new risk prioritization model for failure mode and effects analysis», *Quality & Reliability Eng*, vol. 34, n.º 4, pp. 516–528, jun. 2018, doi: 10.1002/qre.2269.
- [30] J. Reis, P. Pinho, e E. A. Silva, «The use of spatial metrics for the characterisation and analysis of urban form».
- [31] «Canadian Centre for Occupational Health and Safety». Acedido: 19 de setembro de 2023. Disponível em: <https://www.ccohs.ca/>
- [32] *Plant Hazard Analysis and Safety Instrumentation Systems*. Elsevier, 2017. doi: 10.1016/C2015-0-00253-2.
- [33] Y. Wang, L. Duan, F. Zhang, M. Lian, e B. Li, «Dynamic wellbore stability analysis based on thermo-poro-elastic model and quantitative risk assessment method», *Geoenery Science and Engineering*, vol. 229, p. 212063, out. 2023, doi: 10.1016/j.geoen.2023.212063.
- [34] T. Parviainen, F. Goerlandt, I. Helle, P. Haapasaari, e S. Kuikka, «Implementing Bayesian networks for ISO 31000:2018-based maritime oil spill risk management: State-of-art, implementation benefits and challenges, and future research directions», *Journal of Environmental Management*, vol. 278, p. 111520, jan. 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111520.
- [35] «Hazard Analysis Risk Assessment | Duralabel». Acedido: 19 de setembro de 2023. Disponível em: <https://resources.duralabel.com/articles/hazard-analysis-risk-assessment>
- [36] M. Rosa, «Análise de Risco: Uma Ferramenta de Apoio à Decisão.», Instituto de Altos Estudos Militares, Lisboa, 2003. Disponível em: <https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/11867/1/MAJ%20Manuel%20Rosa.pdf>
- [37] S. J. Ghoushchi, S. Yousefi, e M. Khazaeili, «An extended FMEA approach based on the Z-MOORA and fuzzy BWM for prioritization of failures», *Applied Soft Computing*, vol. 81, p. 105505, ago. 2019, doi: 10.1016/j.asoc.2019.105505.
- [38] J. B. Bowles e C. E. Peláez, «Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis», *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 50, n.º 2, pp. 203–213, jan. 1995, doi: 10.1016/0951-8320(95)00068-D.
- [39] A. P. Subriadi e N. F. Najwa, «The consistency analysis of failure mode and effect analysis (FMEA) in information technology risk assessment», *Heliyon*, vol. 6, n.º 1, p. e03161, jan. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03161.
- [40] M. Bertolini, M. Bevilacqua, e R. Massini, «FMECA approach to product traceability in the food industry», *Food Control*, vol. 17, n.º 2, pp. 137–145, fev. 2006, doi: 10.1016/j.foodcont.2004.09.013.
- [41] M. Hodkiewicz, J. W. Klüwer, C. Woods, T. Smoker, e E. Low, «An ontology for reasoning over engineering textual data stored in FMEA spreadsheet tables», *Computers in Industry*, vol. 131, p. 103496, out. 2021, doi: 10.1016/j.compind.2021.103496.
- [42] S. Ebrahimi, K. Vachal, e J. Szmerekovsky, «A Delphi-FMEA model to assess county-level speeding crash risk in North Dakota», *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 16, p. 100688, dez. 2022, doi: 10.1016/j.trip.2022.100688.
- [43] Z. Liu, Y. Bi, e P. Liu, «An evidence theory-based large group FMEA framework incorporating bounded confidence and its application in supercritical water gasification system», *Applied Soft Computing*, vol. 129, p. 109580, nov. 2022, doi: 10.1016/j.asoc.2022.109580.

- [44] M. Cheraghi, A. Eslami Baladeh, e N. Khakzad, «A fuzzy multi-attribute HAZOP technique (FMA-HAZOP): Application to gas wellhead facilities», *Safety Science*, vol. 114, pp. 12–22, abr. 2019, doi: 10.1016/j.ssci.2018.12.024.
- [45] S. Hassan, J. Wang, C. Kontovas, e M. Bashir, «Modified FMEA hazard identification for cross-country petroleum pipeline using Fuzzy Rule Base and approximate reasoning», *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 74, p. 104616, jan. 2022, doi: 10.1016/j.jlp.2021.104616.
- [46] L. Ouyang, Y. Zhu, W. Zheng, e L. Yan, «An information fusion FMEA method to assess the risk of healthcare waste», *Journal of Management Science and Engineering*, vol. 6, n.º 1, pp. 111–124, mar. 2021, doi: 10.1016/j.jmse.2021.01.001.
- [47] J. Ivančan e D. Lisjak, «New FMEA Risks Ranking Approach Utilizing Four Fuzzy Logic Systems», *Machines*, vol. 9, n.º 11, Art. n.º 11, nov. 2021, doi: 10.3390/machines9110292.
- [48] E. G. Haryanto e E. A. Latifa, «Risk Analysis of Toll Road Accident Using Fmea and Ahp Methods», *ARCEE*, vol. 1, n.º 02, Art. n.º 02, fev. 2020, doi: 10.32722/arcee.v1i02.2676.
- [49] H. Reda e A. Dvivedi, «Decision-making on the selection of lean tools using fuzzy QFD and FMEA approach in the manufacturing industry», *Expert Systems with Applications*, vol. 192, p. 116416, abr. 2022, doi: 10.1016/j.eswa.2021.116416.
- [50] J. Balaraju, M. Govinda Raj, e C. S. Murthy, «Fuzzy-FMEA risk evaluation approach for LHD machine-A case study», *Journal of Sustainable Mining*, vol. 18, n.º 4, pp. 257–268, nov. 2019, doi: 10.1016/j.jsm.2019.08.002.
- [51] Y.-P. Hu, X.-Y. You, L. Wang, e H.-C. Liu, «An integrated approach for failure mode and effect analysis based on uncertain linguistic GRA–TOPSIS method», *Soft Comput*, vol. 23, n.º 18, pp. 8801–8814, set. 2019, doi: 10.1007/s00500-018-3480-7.
- [52] W. Kusumasari, Y. Y. Rabung, F. M. Ilmi, e E. Ellizar, «Assessing the safety effect through Google Maps usage: FMEA approach (Case study: Indonesia)», *Case Studies on Transport Policy*, vol. 10, n.º 3, pp. 1917–1929, set. 2022, doi: 10.1016/j.cstp.2022.08.006.
- [53] P. Kardos, P. Lahuta, e M. Hudakova, «Risk Assessment Using the FMEA method in the Organization of Running Events», *Transportation Research Procedia*, vol. 55, pp. 1538–1546, 2021, doi: 10.1016/j.trpro.2021.07.143.
- [54] H.-C. Liu, L. Liu, e N. Liu, «Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review», *Expert Systems with Applications*, vol. 40, n.º 2, pp. 828–838, fev. 2013, doi: 10.1016/j.eswa.2012.08.010.
- [55] E. Ullah, M. M. Baig, H. GholamHosseini, e J. Lu, «Failure mode and effect analysis (FMEA) to identify and mitigate failures in a hospital rapid response system (RRS)», *Heliyon*, vol. 8, n.º 2, p. e08944, fev. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e08944.
- [56] P. harliana e R. Rahim, «Comparative Analysis of Membership Function on Mamdani Fuzzy Inference System for Decision Making», *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 930, n.º 1, p. 012029, dez. 2017, doi: 10.1088/1742-6596/930/1/012029.
- [57] L. A. Zadeh, «Fuzzy sets», *Information and Control*, vol. 8, n.º 3, pp. 338–353, jun. 1965, doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
- [58] E. Adar, M. İnce, B. Karatop, e M. S. Bilgili, «The risk analysis by failure mode and effect analysis (FMEA) and fuzzy-FMEA of supercritical water gasification system used in the sewage sludge treatment», *Journal of Environmental Chemical*

- Engineering*, vol. 5, n.º 1, pp. 1261–1268, fev. 2017, doi: 10.1016/j.jece.2017.02.006.
- [59] M. Yazdi, A. Nedjati, E. Zarei, e R. Abbassi, «A reliable risk analysis approach using an extension of best-worst method based on democratic-autocratic decision-making style», *Journal of Cleaner Production*, vol. 256, p. 120418, mai. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120418.
- [60] G. Sánchez-Torrubia e C. Torres-Blanc, «A MAMDANI-TYPE FUZZY INFERENCE SYSTEM TO AUTOMATICALLY ASSESS DIJKSTRA'S ALGORITHM SIMULATION», 2010. Acedido: 27 de setembro de 2023. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-MAMDANI-TYPE-FUZZY-INFERENCE-SYSTEM-TO-ASSESS-S%C3%A1nchez-Torrubia-Torres-Blanc/6de5cad7957adc2c864912b49b5498443766c58c>
- [61] D. Simon, «Sum normal optimization of fuzzy membership functions», *Int. J. Unc. Fuzz. Knowl. Based Syst.*, vol. 10, n.º 04, pp. 363–384, ago. 2002, doi: 10.1142/S0218488502001533.
- [62] E. H. Mamdani e S. Assilian, «An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller», *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, n.º 1, pp. 1–13, jan. 1975, doi: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2.
- [63] «MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink - MATLAB & Simulink». Acedido: 30 de setembro de 2023. Disponível em: https://www.mathworks.com/?s_tid=gn_logo
- [64] R. S. Almeida, F. Vasconcelos Da Silva, e S. S. V. Vianna, «Combining the bow-tie method and fuzzy logic using Mamdani inference model», *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 169, pp. 159–168, jan. 2023, doi: 10.1016/j.psep.2022.11.005.

Anexos

Anexo A – 250 combinações do método 1

S	O	D	RPN
1	2	2	4
1	2	4	8
1	2	6	12
1	2	8	16
1	2	10	20
1	4	2	8
1	4	4	16
1	4	6	24
1	4	8	32
1	4	10	40
1	6	2	12
1	6	4	24
1	6	6	36
1	6	8	48
1	6	10	60
1	8	2	16
1	8	4	32
1	8	6	48
1	8	8	64
1	8	10	80
1	10	2	20
1	10	4	40
1	10	6	60
1	10	8	80
1	10	10	100

S	O	D	RPN
2	2	2	8
2	2	4	16
2	2	6	24
2	2	8	32
2	2	10	40
2	4	2	16
2	4	4	32
2	4	6	48
2	4	8	64
2	4	10	80
2	6	2	24
2	6	4	48
2	6	6	72
2	6	8	96
2	6	10	120
2	8	2	32
2	8	4	64
2	8	6	96
2	8	8	128
2	8	10	160
2	10	2	40
2	10	4	80
2	10	6	120
2	10	8	160
2	10	10	200

S	O	D	RPN
3	2	2	12
3	2	4	24
3	2	6	36
3	2	8	48
3	2	10	60
3	4	2	24
3	4	4	48
3	4	6	72
3	4	8	96
3	4	10	120
3	6	2	36
3	6	4	72
3	6	6	108
3	6	8	144
3	6	10	180
3	8	2	48
3	8	4	96
3	8	6	144
3	8	8	192
3	8	10	240
3	10	2	60
3	10	4	120
3	10	6	180
3	10	8	240
3	10	10	300

S	O	D	RPN
4	2	2	16
4	2	4	32
4	2	6	48
4	2	8	64
4	2	10	80
4	4	2	32
4	4	4	64
4	4	6	96
4	4	8	128
4	4	10	160
4	6	2	48
4	6	4	96
4	6	6	144
4	6	8	192
4	6	10	240
4	8	2	64
4	8	4	128
4	8	6	192
4	8	8	256
4	8	10	320
4	10	2	80
4	10	4	160
4	10	6	240
4	10	8	320
4	10	10	400

S	O	D	RPN
5	2	2	20
5	2	4	40
5	2	6	60
5	2	8	80
5	2	10	100
5	4	2	40
5	4	4	80
5	4	6	120
5	4	8	160
5	4	10	200
5	6	2	60
5	6	4	120
5	6	6	180
5	6	8	240
5	6	10	300
5	8	2	80
5	8	4	160
5	8	6	240
5	8	8	320
5	8	10	400
5	10	2	100
5	10	4	200
5	10	6	300
5	10	8	400
5	10	10	500

S	O	D	RPN
6	2	2	24
6	2	4	48
6	2	6	72
6	2	8	96
6	2	10	120
6	4	2	48
6	4	4	96
6	4	6	144
6	4	8	192
6	4	10	240
6	6	2	72
6	6	4	144
6	6	6	216
6	6	8	288
6	6	10	360
6	8	2	96
6	8	4	192
6	8	6	288
6	8	8	384
6	8	10	480
6	10	2	120
6	10	4	240
6	10	6	360
6	10	8	480
6	10	10	600

S	O	D	RPN
7	2	2	28
7	2	4	56
7	2	6	84
7	2	8	112
7	2	10	140
7	4	2	56
7	4	4	112
7	4	6	168
7	4	8	224
7	4	10	280
7	6	2	84
7	6	4	168
7	6	6	252
7	6	8	336
7	6	10	420
7	8	2	112
7	8	4	224
7	8	6	336
7	8	8	448
7	8	10	560
7	10	2	140
7	10	4	280
7	10	6	420
7	10	8	560
7	10	10	700

S	O	D	RPN
8	2	2	32
8	2	4	64
8	2	6	96
8	2	8	128
8	2	10	160
8	4	2	64
8	4	4	128
8	4	6	192
8	4	8	256
8	4	10	320
8	6	2	96
8	6	4	192
8	6	6	288
8	6	8	384
8	6	10	480
8	8	2	128
8	8	4	256
8	8	6	384
8	8	8	512
8	8	10	640
8	10	2	160
8	10	4	320
8	10	6	480
8	10	8	640
8	10	10	800

S	O	D	RPN
9	2	2	36
9	2	4	72
9	2	6	108
9	2	8	144
9	2	10	180
9	4	2	72
9	4	4	144
9	4	6	216
9	4	8	288
9	4	10	360
9	6	2	108
9	6	4	216
9	6	6	324
9	6	8	432
9	6	10	540
9	8	2	144
9	8	4	288
9	8	6	432
9	8	8	576
9	8	10	720
9	10	2	180
9	10	4	360
9	10	6	540
9	10	8	720
9	10	10	900

S	O	D	RPN
10	2	2	40
10	2	4	80
10	2	6	120
10	2	8	160
10	2	10	200
10	4	2	80
10	4	4	160
10	4	6	240
10	4	8	320
10	4	10	400
10	6	2	120
10	6	4	240
10	6	6	360
10	6	8	480
10	6	10	600
10	8	2	160
10	8	4	320
10	8	6	480
10	8	8	640
10	8	10	800
10	10	2	200
10	10	4	400
10	10	6	600
10	10	8	800
10	10	10	1000

Anexo B – Regras do método 1

1. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL1) (1)
2. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL1) (1)
3. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is M) then (RPN is VL1) (1)
4. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is H) then (RPN is VL1) (1)
5. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is VH) then (RPN is VL1) (1)
6. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL1) (1)
7. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL1) (1)
8. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is M) then (RPN is VL1) (1)
9. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is H) then (RPN is VL2) (1)
10. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is VH) then (RPN is VL2) (1)
11. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL1) (1)
12. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL1) (1)
13. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is M) then (RPN is VL2) (1)
14. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is H) then (RPN is VL2) (1)
15. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is VH) then (RPN is VL2) (1)
16. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL1) (1)
17. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL2) (1)
18. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is M) then (RPN is VL2) (1)
19. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is H) then (RPN is VL2) (1)
20. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is VH) then (RPN is VL2) (1)
21. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL1) (1)
22. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL2) (1)
23. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is M) then (RPN is VL2) (1)
24. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is H) then (RPN is VL2) (1)
25. If (severidade is VL1) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is VH) then (RPN is VL2) (1)
26. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL1) (1)
27. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL1) (1)
28. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is M) then (RPN is VL1) (1)
29. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is H) then (RPN is VL2) (1)
30. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is VH) then (RPN is VL2) (1)
31. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL1) (1)
32. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL2) (1)
33. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is M) then (RPN is VL2) (1)

34. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is H) then (RPN is VL3) (1)
35. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is VH) then (RPN is VL3) (1)
36. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL1) (1)
37. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL2) (1)
38. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is M) then (RPN is VL3) (1)
39. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is H) then (RPN is VL3) (1)
40. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is VH) then (RPN is VL4) (1)
41. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL2) (1)
42. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL3) (1)
43. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is M) then (RPN is VL3) (1)
44. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is H) then (RPN is VL4) (1)
45. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is VH) then (RPN is VL4) (1)
46. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL2) (1)
47. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL3) (1)
48. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is M) then (RPN is VL4) (1)
49. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is H) then (RPN is VL4) (1)
50. If (severidade is VL2) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is VH) then (RPN is VL4) (1)
51. If (severidade is L2) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL1) (1)
52. If (severidade is L2) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL2) (1)
53. If (severidade is L2) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is M) then (RPN is VL2) (1)
54. If (severidade is L2) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is H) then (RPN is VL3) (1)
55. If (severidade is L2) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is VH) then (RPN is VL3) (1)
56. If (severidade is L2) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL2) (1)
57. If (severidade is L2) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL3) (1)
58. If (severidade is L2) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is M) then (RPN is VL3) (1)
59. If (severidade is L2) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is H) then (RPN is VL4) (1)
60. If (severidade is L2) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is VH) then (RPN is L1) (1)
61. If (severidade is L2) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL2) (1)
62. If (severidade is L2) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL3) (1)
63. If (severidade is L2) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is M) then (RPN is VL4) (1)
64. If (severidade is L2) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is H) then (RPN is L1) (1)
65. If (severidade is L2) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is VH) then (RPN is L2) (1)
66. If (severidade is L2) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL3) (1)

67. If (severidade is L2) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL4) (1)
68. If (severidade is L2) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is M) then (RPN is L1) (1)
69. If (severidade is L2) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is H) then (RPN is L3) (1)
70. If (severidade is L2) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is VH) then (RPN is L4) (1)
71. If (severidade is L2) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL3) (1)
72. If (severidade is L2) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is L) then (RPN is L1) (1)
73. If (severidade is L2) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is M) then (RPN is L2) (1)
74. If (severidade is L2) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is H) then (RPN is L4) (1)
75. If (severidade is L2) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is VH) then (RPN is L4) (1)
76. If (severidade is L1) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL1) (1)
77. If (severidade is L1) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL1) (1)
78. If (severidade is L1) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is M) then (RPN is VL2) (1)
79. If (severidade is L1) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is H) then (RPN is VL2) (1)
80. If (severidade is L1) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is VH) then (RPN is VL2) (1)
81. If (severidade is L1) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL1) (1)
82. If (severidade is L1) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL2) (1)
83. If (severidade is L1) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is M) then (RPN is VL3) (1)
84. If (severidade is L1) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is H) then (RPN is VL3) (1)
85. If (severidade is L1) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is VH) then (RPN is VL4) (1)
86. If (severidade is L1) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL2) (1)
87. If (severidade is L1) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL3) (1)
88. If (severidade is L1) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is M) then (RPN is VL4) (1)
89. If (severidade is L1) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is H) then (RPN is VL4) (1)
90. If (severidade is L1) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is VH) then (RPN is L1) (1)
91. If (severidade is L1) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL2) (1)
92. If (severidade is L1) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL3) (1)
93. If (severidade is L1) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is M) then (RPN is VL4) (1)
94. If (severidade is L1) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is H) then (RPN is L1) (1)
95. If (severidade is L1) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is VH) then (RPN is L2) (1)
96. If (severidade is L1) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL2) (1)
97. If (severidade is L1) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL4) (1)
98. If (severidade is L1) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is M) then (RPN is L1) (1)
99. If (severidade is L1) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is H) then (RPN is L2) (1)

-
100. If (severidade is L1) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is VH) then (RPN is L2) (1)
 101. If (severidade is M2) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL1) (1)
 102. If (severidade is M2) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL2) (1)
 103. If (severidade is M2) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is M) then (RPN is VL3) (1)
 104. If (severidade is M2) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is H) then (RPN is VL3) (1)
 105. If (severidade is M2) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is VH) then (RPN is VL4) (1)
 106. If (severidade is M2) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL2) (1)
 107. If (severidade is M2) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL3) (1)
 108. If (severidade is M2) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is M) then (RPN is VL4) (1)
 109. If (severidade is M2) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is H) then (RPN is L1) (1)
 110. If (severidade is M2) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is VH) then (RPN is L2) (1)
 111. If (severidade is M2) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL3) (1)
 112. If (severidade is M2) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL4) (1)
 113. If (severidade is M2) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is M) then (RPN is L2) (1)
 114. If (severidade is M2) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is H) then (RPN is L3) (1)
 115. If (severidade is M2) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is VH) then (RPN is M1) (1)
 116. If (severidade is M2) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL3) (1)
 117. If (severidade is M2) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is L) then (RPN is L1) (1)
 118. If (severidade is M2) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is M) then (RPN is L3) (1)
 119. If (severidade is M2) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is H) then (RPN is M1) (1)
 120. If (severidade is M2) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is VH) then (RPN is M3) (1)
 121. If (severidade is M2) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL4) (1)
 122. If (severidade is M2) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is L) then (RPN is L2) (1)
 123. If (severidade is M2) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is M) then (RPN is M1) (1)
 124. If (severidade is M2) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is H) then (RPN is M3) (1)
 125. If (severidade is M2) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is VH) then (RPN is M4) (1)
 126. If (severidade is M1) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL1) (1)
 127. If (severidade is M1) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL2) (1)
 128. If (severidade is M1) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is M) then (RPN is VL2) (1)
 129. If (severidade is M1) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is H) then (RPN is VL3) (1)
 130. If (severidade is M1) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is VH) then (RPN is VL3) (1)
 131. If (severidade is M1) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL2) (1)
 132. If (severidade is M1) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL3) (1)

-
133. If (severidade is M1) and (detetabilidade is L) and (ocorrencia is M) then (RPN is VL4) (1)
 134. If (severidade is M1) and (detetabilidade is L) and (ocorrencia is H) then (RPN is L1) (1)
 135. If (severidade is M1) and (detetabilidade is L) and (ocorrencia is VH) then (RPN is L1) (1)
 136. If (severidade is M1) and (detetabilidade is M) and (ocorrencia is VL) then (RPN is VL2) (1)
 137. If (severidade is M1) and (detetabilidade is M) and (ocorrencia is L) then (RPN is VL4) (1)
 138. If (severidade is M1) and (detetabilidade is M) and (ocorrencia is M) then (RPN is L1) (1)
 139. If (severidade is M1) and (detetabilidade is M) and (ocorrencia is H) then (RPN is L2) (1)
 140. If (severidade is M1) and (detetabilidade is M) and (ocorrencia is VH) then (RPN is L3) (1)
 141. If (severidade is M1) and (detetabilidade is H) and (ocorrencia is VL) then (RPN is VL3) (1)
 142. If (severidade is M1) and (detetabilidade is H) and (ocorrencia is L) then (RPN is L1) (1)
 143. If (severidade is M1) and (detetabilidade is H) and (ocorrencia is M) then (RPN is L2) (1)
 144. If (severidade is M1) and (detetabilidade is H) and (ocorrencia is H) then (RPN is L4) (1)
 145. If (severidade is M1) and (detetabilidade is H) and (ocorrencia is VH) then (RPN is M1) (1)
 146. If (severidade is M1) and (detetabilidade is VH) and (ocorrencia is VL) then (RPN is VL3) (1)
 147. If (severidade is M1) and (detetabilidade is VH) and (ocorrencia is L) then (RPN is L1) (1)
 148. If (severidade is M1) and (detetabilidade is VH) and (ocorrencia is M) then (RPN is L3) (1)
 149. If (severidade is M1) and (detetabilidade is VH) and (ocorrencia is H) then (RPN is M1) (1)
 150. If (severidade is M1) and (detetabilidade is VH) and (ocorrencia is VH) then (RPN is M2) (1)
 151. If (severidade is H1) and (detetabilidade is VL) and (ocorrencia is VL) then (RPN is VL2) (1)
 152. If (severidade is H1) and (detetabilidade is VL) and (ocorrencia is L) then (RPN is VL2) (1)
 153. If (severidade is H1) and (detetabilidade is VL) and (ocorrencia is M) then (RPN is VL3) (1)
 154. If (severidade is H1) and (detetabilidade is VL) and (ocorrencia is H) then (RPN is VL4) (1)
 155. If (severidade is H1) and (detetabilidade is VL) and (ocorrencia is VH) then (RPN is VL4) (1)
 156. If (severidade is H1) and (detetabilidade is L) and (ocorrencia is VL) then (RPN is VL2) (1)
 157. If (severidade is H1) and (detetabilidade is L) and (ocorrencia is L) then (RPN is VL4) (1)
 158. If (severidade is H1) and (detetabilidade is L) and (ocorrencia is M) then (RPN is L1) (1)
 159. If (severidade is H1) and (detetabilidade is L) and (ocorrencia is H) then (RPN is L2) (1)
 160. If (severidade is H1) and (detetabilidade is L) and (ocorrencia is VH) then (RPN is L3) (1)
 161. If (severidade is H1) and (detetabilidade is M) and (ocorrencia is VL) then (RPN is VL3) (1)
 162. If (severidade is H1) and (detetabilidade is M) and (ocorrencia is L) then (RPN is L1) (1)
 163. If (severidade is H1) and (detetabilidade is M) and (ocorrencia is M) then (RPN is L3) (1)
 164. If (severidade is H1) and (detetabilidade is M) and (ocorrencia is H) then (RPN is L4) (1)
 165. If (severidade is H1) and (detetabilidade is M) and (ocorrencia is VH) then (RPN is M2) (1)

-
166. If (severidade is H1) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL4) (1)
167. If (severidade is H1) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is L) then (RPN is L2) (1)
168. If (severidade is H1) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is M) then (RPN is L4) (1)
169. If (severidade is H1) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is H) then (RPN is M2) (1)
170. If (severidade is H1) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is VH) then (RPN is H1) (1)
171. If (severidade is H1) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL4) (1)
172. If (severidade is H1) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is L) then (RPN is L3) (1)
173. If (severidade is H1) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is M) then (RPN is M2) (1)
174. If (severidade is H1) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is H) then (RPN is H1) (1)
175. If (severidade is H1) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is VH) then (RPN is H2) (1)
176. If (severidade is H2) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL2) (1)
177. If (severidade is H2) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL3) (1)
178. If (severidade is H2) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is M) then (RPN is VL3) (1)
179. If (severidade is H2) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is H) then (RPN is VL4) (1)
180. If (severidade is H2) and (detetabilidade is VL) and (ocorrenca is VH) then (RPN is L1) (1)
181. If (severidade is H2) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL3) (1)
182. If (severidade is H2) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is L) then (RPN is VL4) (1)
183. If (severidade is H2) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is M) then (RPN is L1) (1)
184. If (severidade is H2) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is H) then (RPN is L3) (1)
185. If (severidade is H2) and (detetabilidade is L) and (ocorrenca is VH) then (RPN is L4) (1)
186. If (severidade is H2) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL3) (1)
187. If (severidade is H2) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is L) then (RPN is L1) (1)
188. If (severidade is H2) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is M) then (RPN is L3) (1)
189. If (severidade is H2) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is H) then (RPN is M1) (1)
190. If (severidade is H2) and (detetabilidade is M) and (ocorrenca is VH) then (RPN is M3) (1)
191. If (severidade is H2) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is VL) then (RPN is VL4) (1)
192. If (severidade is H2) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is L) then (RPN is L3) (1)
193. If (severidade is H2) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is M) then (RPN is M1) (1)
194. If (severidade is H2) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is H) then (RPN is M4) (1)
195. If (severidade is H2) and (detetabilidade is H) and (ocorrenca is VH) then (RPN is H2) (1)
196. If (severidade is H2) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is VL) then (RPN is L1) (1)
197. If (severidade is H2) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is L) then (RPN is L4) (1)
198. If (severidade is H2) and (detetabilidade is VH) and (ocorrenca is M) then (RPN is M3) (1)

