

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

VICTOR FERREIRA VILLARINO

**PROPOSTA DE UMA NOVA ABORDAGEM DA FERRAMENTA FMEA PARA O
DESENVOLVIMENTO DE NOVOS PRODUTOS**

GUARAPUAVA

2022

VICTOR FERREIRA VILLARINO

**PROPOSTA DE UMA NOVA ABORDAGEM DA FERRAMENTA FMEA PARA O
DESENVOLVIMENTO DE NOVOS PRODUTOS**

**PROPOSAL OF A NEW APPROACH OF THE FMEA TOOL FOR THE
DEVELOPMENT OF NEW PRODUCTS**

**Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).**

Orientador: Ricardo Vinícius Bubna Biscaia

GUARAPUAVA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

VICTOR FERREIRA VILLARINO

**PROPOSTA DE UMA NOVA ABORDAGEM DA FERRAMENTA FMEA PARA O
DESENVOLVIMENTO DE NOVOS PRODUTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Mecânica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador(a): Ricardo Vinícius Bubna Biscaia

Data de aprovação: 21/novembro/2022

Ricardo Vinícius Bubna Biscaia
Doutorado em Engenharia de Produção
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

André Luiz Soares
Doutorado em Engenharia de Produção
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Franciele Bonatto
Doutorado em Engenharia de Produção
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

GUARAPUAVA

2022

Dedico este trabalho a meu pai, minha irmã e principalmente a minha mãe, que me acompanhou durante toda a graduação, incluindo o início deste trabalho, e não pode ver sua conclusão.

RESUMO

Em um mercado cada vez mais competitivo, buscar otimizar ferramentas que reduzam as falhas e custos finais durante o desenvolvimento de novos produtos é fundamental na competitividade. Neste cenário a ferramenta FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) é amplamente utilizada na análise do modo e efeito de falha, mas apresenta limitações quanto a quantificação dos riscos através do RPN (*Risk Priority Number*). Desta forma, este trabalho buscou uma adaptação do cálculo do RPN no FMEA, baseado em métodos de auxílio a tomada de decisões por multicritérios, sendo aplicado o *Direct Rating* para um ponderamento de pesos dos critérios e o método *Fuzzy-TOPSIS* para tomada de decisão. O método foi aplicado ao projeto de fornos de carbonização transportáveis de Biscaia (2021), buscando uma avaliação da viabilidade do método desenvolvido. Pode-se verificar que o método auxiliou na distribuição das incertezas existentes e melhoria na ordenação dos riscos, se comparado ao método de cálculo do RPN tradicional. A adição de novos critérios de falha expandiu a avaliação em critérios relacionados a custos e a manutenibilidade, antes desconsiderados ou intrínsecos aos critérios tradicionais. O método proposto eliminou empates entre valores de RPN, trazendo uma análise mais precisa dos modos de falha críticos e que exigem ações mais urgentes e relevantes na etapa de desenvolvimento de novos produtos.

Palavras-chave: RPN; *fuzzy-TOPSIS*; FMEA; *direct rating*; desenvolvimento de novos produtos.

ABSTRACT

In an increasingly efficient market, optimizing the tools that reduce the search and the final costs of the product or process is an essential point for competitiveness. In this scenario, the FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) tool is widely used in the analysis of the failure mode and effect, but it presents all the risks through the quantification of the RPN (Risk Priority Number). In this way, this work sought an adaptation of the RPN evaluation criterion in the FMEA, based on decision-making aid methods, using the Direct Rating for variables and the Fuzzy-TOPSIS method for decision making. The method was applied to the project of transportable carbonization furnaces of Biscaia (2021), seeking an assessment of the feasibility of the optimized method. It is possible to visualize the auxiliary method in the distribution of the existing uncertainties and not to point out the greatest importance for the realization of the project. The inclusion of new criteria for considering expansion criteria in relation to maintenance and criteria, before criteria for considering traditional criteria. The proposed method was eliminated among the RPN values, combining an analysis between the critical failure modes and that require more urgent and relevant actions in the new product development stage.

Keywords: RPN; fuzzy-TOPSIS; FMEA; direct rating; development of new products.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo Árvore de Falhas.....	15
Figura 2 - Ciclo PDCA.....	17
Figura 3 - Processo de Desenvolvimento de Produto.....	28
Figura 4 - Etapas da metodologia.....	30

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Exemplo aplicação método HAZOP.....	16
Quadro 2 - Formulário FMEA.....	19
Quadro 3 - Exemplo 1 Avaliação de Severidade.....	20
Quadro 4 - Exemplo 2 Avaliação de Severidade.....	21
Quadro 5 - Exemplo Avaliação de Ocorrência.....	22
Quadro 6 - Exemplo Avaliação de Detectabilidade.....	23
Quadro 7 - Avaliação do Risco de FMEA de Processo.....	24
Quadro 8 – Problemas e soluções sugeridas para o FMEA.....	27
Quadro 9 - Matriz de decisão <i>fuzzy</i> normalizada.....	33
Quadro 10 - Variáveis linguísticas para o peso de importância de cada critério.....	34
Quadro 11 - Resumo das melhorias propostas pelo método FMEA aplicado no desenvolvimento de novos produtos.....	35
Quadro 12 - Modos de falhas.....	39
Quadro 13 - Avaliação <i>Fuzzy</i>	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pesos <i>Direct Rating</i>	37
Tabela 2 - Números triangulares <i>Fuzzy</i>	41
Tabela 3 - RPN <i>Fuzzy</i>	43
Tabela 4 - Comparações RPN.....	45

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivos	11
1.1.1 Objetivo Geral	11
1.1.2 Objetivos Específicos	11
1.2 Justificativa	11
2 REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 Ferramentas de qualidade para a análise de falhas e suas causas	14
2.1.1 Análise da Árvore de Falhas (FTA)	14
2.1.2 Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP)	16
2.1.3 Ciclo PDCA	17
2.2 FMEA	18
2.2.1 FMEA de processos	23
2.2.2 FMEA de projeto	24
2.2.3 Melhorias no FMEA.....	26
2.3 Desenvolvimento de novos produtos	27
3 METODOLOGIA	30
3.1 Critérios para tomada de decisão	31
3.2 Métodos de auxílio à tomada de decisão	31
3.2.1 Método de ponderamento: <i>Direct Rating</i>	32
3.2.2 Método de decisão: <i>Fuzzy-TOPSIS</i>	32
3.3 Aplicação no estudo de caso	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1 Definição de critérios adicionais para tomada de decisão	36
4.2 Aplicação do método de ponderamento (<i>Direct Rating</i>)	37
4.3 Aplicação do método de tomada de decisão <i>Fuzzy-TOPSIS</i>	38
4.4 Comparações	45
5 CONCLUSÕES	48
REFERÊNCIAS	49
APÊNDICE A - Formulário para definição do critério de ponderamento <i>Direct Rating</i>	51
APÊNDICE B – Artigo publicado no XII ConBRepro	55

1 INTRODUÇÃO

Análise de modos e efeitos de falha, comumente abreviado por FMEA (do inglês *Failure Mode and Effect Analysis*) é um método de análise de falhas amplamente utilizado em produtos e processos para quantificar riscos de modo a tentar reduzi-los em interações futuras (FORD MOTOR COMPANY, 2004).

O FMEA foi utilizado pela primeira vez em 1949 para operações militares e em 1956 foi adotado pela Boeing para o desenvolvimento em indústrias automotivas como uma ferramenta para melhoria da qualidade de seus produtos (MZOUGUI; FELSOUFI, 2019). Desde então é utilizado em muitas indústrias como o modelo padrão de análise de riscos tanto para o desenvolvimento de novos produtos, quanto para análise de processos e equipamentos de processos industriais.

Para quantificar os riscos, o FMEA utiliza o RPN (do inglês *Risk Priority Number*) que é um número obtido ao se multiplicar os três indicadores considerados para priorizar o risco, que são: A Severidade (S) de uma falha caso esta venha a ocorrer, a probabilidade de Ocorrência (O) de uma falha, e a Detectabilidade (D) de uma falha. Cada um desses indicadores é numerado de 1 a 10, sendo números menores, riscos de menor severidade, menor ocorrência e fácil detectabilidade da falha em análise. Números maiores, portanto, são associados a falhas com risco de maior severidade, com ocorrência mais frequente e com menor capacidade de detecção. Assim o valor de RPN pode variar entre 1 a 1000 para cada falha analisada (FORD MOTOR COMPANY, 2004).

Apesar de amplamente aceito e aplicado no setor industrial tanto para desenvolvimento de novos produtos (avaliando-se a probabilidade de falha em projetos em desenvolvimento) quanto em processos de produção (avaliando equipamentos em operação) o FMEA tem muitas limitações quanto ao cálculo do RPN.

Diferentes valores de severidade, ocorrência e detectabilidade podem gerar os mesmos valores de RPN apesar de representarem riscos completamente diferentes (JIN; RAN; ZHANG, 2021; LO; LIOU, 2018). O cálculo do RPN consiste em apenas 3 fatores de segurança. Fatores econômicos, por exemplo, não são

considerados (LO; LIOU, 2018; LO et al., 2019; MZOUGUI; FELSOUFI, 2019; JIN; RAN; ZHANG, 2021). Quanto aos valores de RPN, eles são descontínuos, valores como 901 a 999 nunca poderão ser obtidos por esse meio (MZOUGUI; FELSOUFI, 2019; QIN; XI; PEDRYCZ, 2020). Em relação aos pesos de cada método de falha, eles são sempre os mesmos quando comparados entre si (LO et al., 2019; MZOUGUI; FELSOUFI, 2019; QIN; XI; PEDRYCZ, 2020; JIN; RAN; ZHANG, 2021). Finalmente, a escala de 1 a 10 para cada fator de risco é muito generalizada, podendo gerar diferentes opiniões para diferentes analistas (QIN; XI; PEDRYCZ, 2020).

Portanto, verifica-se que existem diversas limitações no método de análise de modos e efeitos de falhas. Uma melhoria do FMEA, como ferramenta de análise de riscos, que visasse a resolução das limitações identificadas e que fosse focada no desenvolvimento de produtos, poderia auxiliar na redução dos efeitos das falhas previamente identificadas, com maior eficiência.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivos geral e específicos:

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma adaptação ao FMEA baseada em métodos de auxílio à tomada de decisão por multicritérios para desenvolvimento de novos produtos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar a necessidade de inserção de novos critérios de tomada de decisão a fim de reduzir a incerteza presente no método do FMEA.
- Definir uma metodologia que evite ou reduza a probabilidade de obtenção de riscos com o mesmo nível de importância.
- Aplicar o método FMEA proposto em um produto em desenvolvimento.
- Analisar as vantagens e desvantagens do método proposto, comparando-o com o FMEA original.

1.2 Justificativa

Uma definição confiável de valores de risco é muito importante em projetos para que este possa ser aperfeiçoado corretamente visando a segurança. Quando os

modos de falhas possuem valores de RPN próximos no FMEA eles deveriam representar riscos similares. Porém, em casos de extrema severidade, e níveis de detectabilidade e ocorrência baixos, o RPN é classificado pela metodologia como baixo.

Exemplificando uma falha definida como a explosão de uma caldeira industrial (poderia ser classificada como severidade 10, detectabilidade 1 e ocorrência 1), geraria um RPN baixo. Porém, se efetivamente a falha ocorra causará grandes problemas classificados como de alta severidade ao processo. Portanto, entende-se que existe a necessidade de obtenção de pesos que possam diferenciar o nível de importância de cada critério, para o cálculo do RPN. (QIN; XI; PEDRYCZ, 2020).

Mzougui e Felsoufi (2019) aplicaram pesos para cada variável do FMEA obtendo a severidade como critério mais importante. Em casos de falhas críticas, a severidade deve ter um peso muito mais importante para o cálculo de risco comparado aos outros critérios considerando que em caso de falha, todo o projeto, e a segurança daqueles envolvidos, pode estar em risco. Portanto, como não há previsão de avaliação de pesos para diferentes critérios avaliados, a estruturação do método que permita essa avaliação, contribuiria na validação dos riscos avaliados.

Outra limitação do RPN está associada à aplicação de apenas 3 variáveis de segurança. Em um projeto, fatores como tempo de produção e custos são muito importantes para definir a sua viabilidade (MZOUGUI; FELSOUFI, 2019). Portanto, os custos e o processo produtivo, poderiam ser critérios relevantes, na obtenção de um RPN, para o desenvolvimento de um produto.

Por tratar-se de uma multiplicação a escala de RPN tem uma natureza exponencial, valores mais baixos são diferenciados nas ordens das unidades enquanto valores mais altos se diferem apenas por dezenas ou até centenas. Em um projeto que contenha valores de RPN muito altos (acima de 500 por exemplo) e valores altos (acima de 100 por exemplo), os valores muito altos terão uma magnitude tão grande que podem diminuir a real importância dos outros riscos (QIN; XI; PEDRYCZ, 2020).

Além disso, Mzougui e Felsoufi (2019) também consideram difícil que diferentes especialistas cheguem em um consenso para classificação de riscos. As

escalas de 1 a 10 utilizadas são muito subjetivas principalmente quando aplicadas em projetos de novos produtos onde os critérios podem ser apenas imaginados baseados em produtos similares. Portanto, não há uma métrica a ser seguida além da definição linguística que pode variar pela interpretação de cada especialista.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta revisão de literatura foram analisadas diferentes ferramentas de qualidade que visam análise de riscos, em sequência, uma análise aprofundada da ferramenta FMEA, identificando suas variações apresentadas na literatura, bem como, melhorias propostas por diferentes autores, e por fim, uma análise no desenvolvimento de novos produtos com a aplicação do FMEA de produto.

2.1 Ferramentas de qualidade para a análise de falhas e suas causas

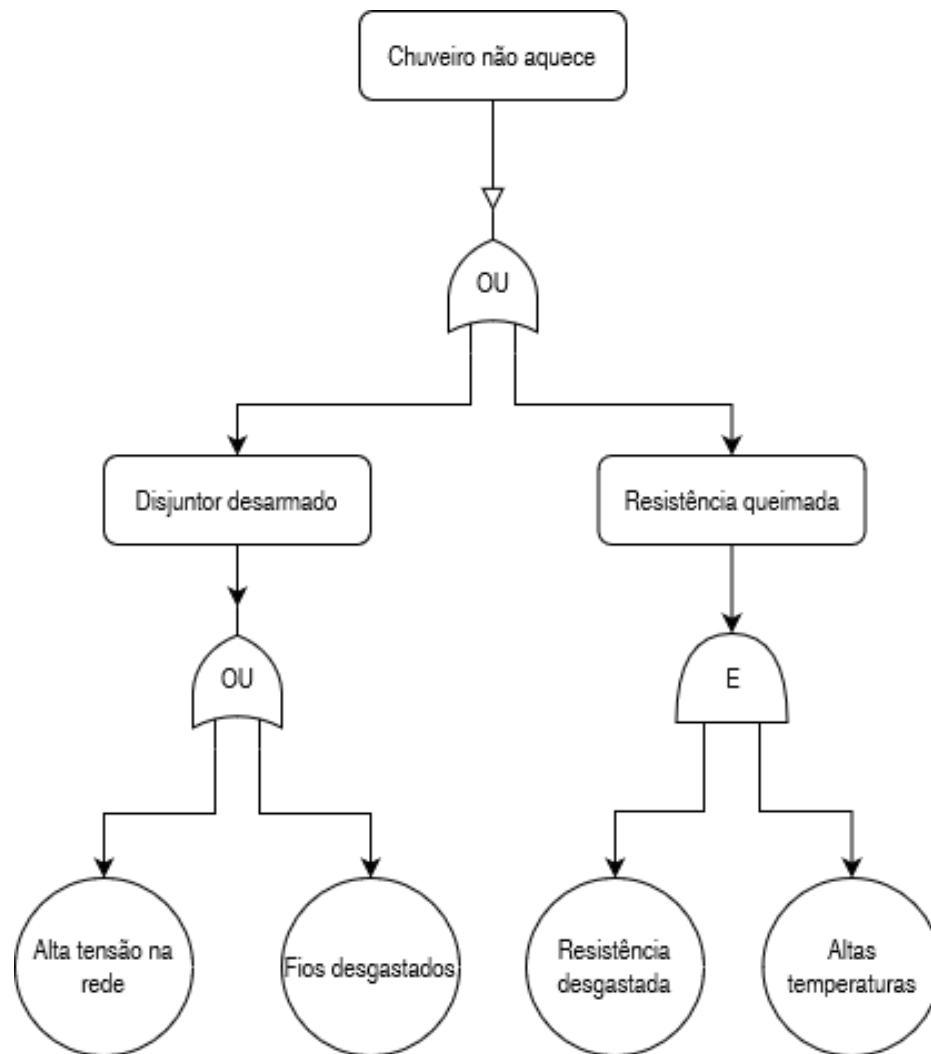
Ferramentas de qualidade são de grande importância devido a competitividade do mercado com clientes cada vez mais exigentes, estas ferramentas são utilizadas para auxiliar na resolução de problemas (CAMPOS, 2014).

Ferramentas para análise de falhas são um caso especial das ferramentas de qualidade onde é feita uma análise de falhas possíveis em um projeto de modo a levantar fatores importantes como causas, consequências, riscos presentes e métodos de resolução para que seja garantida uma maior segurança e confiabilidade (CAMPOS, 2014).

A seguir são abordados os métodos de Análise da Árvore de Falhas (FTA), método HAZOP e em sequência uma análise mais aprofundada da ferramenta do FMEA.

2.1.1 Análise da Árvore de Falhas (FTA)

A Análise da Árvore de Falhas (do inglês *Fault Tree Analysis*) é uma ferramenta visual muito utilizada para análise de riscos, na FTA é feita uma abordagem *Top-Down* onde as falhas principais são inseridas no topo da árvore e partir delas são analisadas as possíveis causas de falha até que se obtenha o evento primário de falha, onde o problema deve ser corrigido (PRÁ, 2010).

Figura 1 - Exemplo Árvore de Falhas

Fonte: Autoria própria

Para relacionar dois eventos na construção da árvore são utilizadas portas lógicas para definir as causas de falhas, na Figura 1 há um exemplo de falha de aquecimento em um chuveiro elétrico, como contribuidores primários tem-se o desarmamento do disjuntor ou a queima da resistência. Em sequência, para que ocorra o desarmamento do disjuntor é preciso que nos eventos primários, ou tenha-se uma alta tensão na rede, ou a fiação esteja desgastada. Já para o caso de queima da resistência foram necessários dois eventos primários ocorrendo simultaneamente, o desgaste da resistência e a presença de altas temperaturas.

A FTA é bem útil para visualizar rapidamente as causas que levam a um problema em questão, organizando-os em um fluxograma de fácil compreensão (FORNAZARI, 2018). No entanto, ela é limitada a apenas uma falha principal por

árvore dado a sua estrutura, projetos com diversas falhas principais necessitam de múltiplas árvores dificultando a visualização.

Fornazari (2018) aplicou a FTA para determinar as falhas de um compressor GA 75 W Atlas Copco aplicado na indústria e observou que há um fator subjetivo presente na ferramenta, exemplificando que pessoas diferentes realizando a construção da mesma árvore de falhas poderiam gerar árvores diferentes.

2.1.2 Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP)

O HAZOP (do inglês *Hazard and Operability Study*) é uma ferramenta que analisa causas e consequências de falhas, utilizando-se de variáveis e palavras-guia, para adotar metodologias e ações de correção.

A estrutura do HAZOP é feita em uma tabela onde primeiramente é indicada a variável de processo em estudo seguida de uma palavra-guia que definirá o comportamento da variável em estudo. Em seguida são apontadas as causas para a ocorrência de tal comportamento, assim como as consequências para o projeto (SELLA, 2014).

Finalmente, quando todos os fatores forem apontados, são levantadas as medidas preventivas que podem ser adotadas para diminuir, ou extinguir a falha (SELLA, 2014).

No Quadro 1 a seguir pode ser observado um exemplo do método HAZOP sendo utilizado para um aumento de temperatura em motor de automóvel.

Quadro 1 - Exemplo aplicação método HAZOP

Variável	Palavra-guia	Significado	Causas	Consequências	Medidas
Temperatura	Alto	Alta Temperatura	Baixo nível do fluido de arrefecimento	Entortamento dos cilindros	Checar nível do fluido de arrefecimento
			Baixo nível de óleo	Derretimento de componentes	Checar nível do óleo
			Termostato desregulado	Riscos de acidente ao motorista	Regular ou trocar termostado

Fonte: Autoria própria

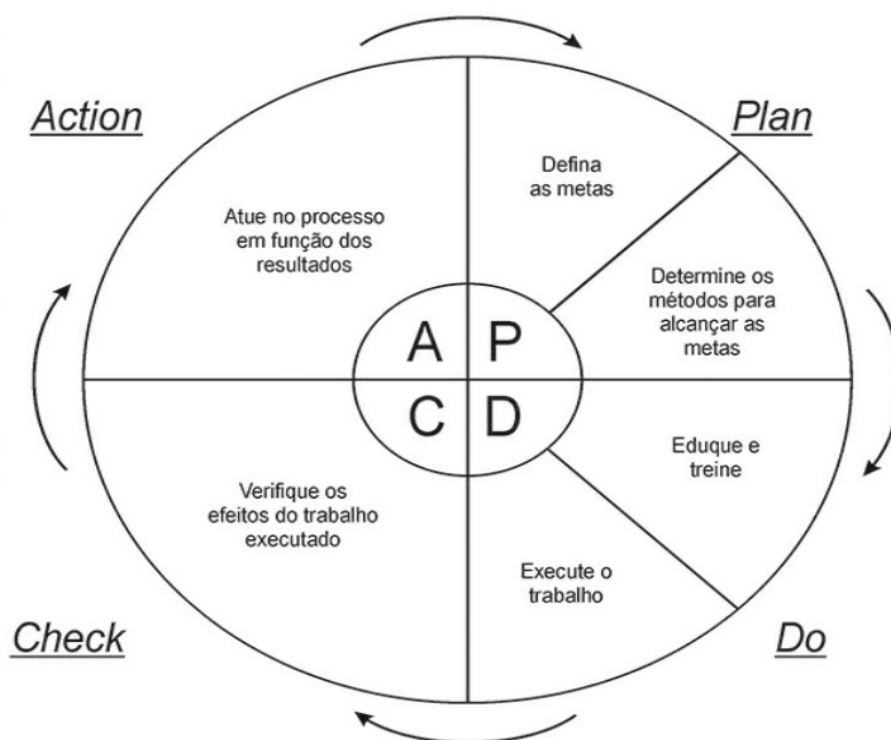
O HAZOP é uma ferramenta adequada para uso em ambientes industriais, onde há a utilização de diversas variáveis nos processos. Porém, devido a sua

estrutura baseada em variáveis, falhas não-quantitativas (como rompimento de uma viga ou manuseio incorreto) não podem ser abordadas por esta ferramenta.

2.1.3 Ciclo PDCA

O ciclo PDCA (do inglês *Plan Do Check Act*) é uma ferramenta para definição de metas que devem ser realizadas através de um ciclo de planejar o que deve ser feito, realizar o planejado, verificar o sucesso da execução e agir em casos de correção necessária.

Figura 2 - Ciclo PDCA



Fonte: Campos (2013)

De acordo com Campos (2013), o PDCA é o caminho para definição de metas, podendo elas ser metas para manter ou metas para melhorar, em metas para manter deve ser definido o procedimento operacional padrão, enquanto que para metas focadas na melhoria, o procedimento operacional padrão deve ser atualizado de forma que atenda as novas metas.

Granero (2014) aplicou o ciclo PDCA e obteve uma diminuição de 24% no número de reclamações em uma linha de produção de sobremesas em um ano após sua implementação.

Scheffer (2018) aplicou três ciclos PDCA em seu estudo de aplicação de fita adesiva sobre tubos evaporadores de refrigerador e ao final de cada ciclo realizado foi retirada uma conclusão para o prosseguimento do projeto.

2.2 FMEA

O FMEA tem como objetivo a prevenção de problemas de um projeto ou processo através do levantamento de todos os métodos de falha dos componentes e classificando-os conforme seus graus de severidade, ocorrência e detecção (FORD MOTOR COMPANY, 2004).

Quando comparado às ferramentas de qualidade anteriormente mencionadas, o FMEA é mais adequado para a análise de riscos e falhas por analisar diversas falhas potenciais, enumerar seus riscos e por fim tentar diminuir suas probabilidades e severidades (QIN; XI; PEDRYCZ, 2020).

Com um FMEA bem implementado, o projeto ou processo pode ser alterado conforme a classificação de riscos obtida, utilizando os recursos para correção de falhas mais críticas (FORD MOTOR COMPANY, 2004).

De acordo com o Formulário apresentado no Quadro 2, o primeiro passo para a análise é a descrição dos processos ou produtos que serão implantados seguido de suas funções. Com as funções definidas, inicia-se a análise de falhas potenciais.

Quadro 2 - Formulário FMEA

Descrição do Produto/ Processo	Função(ões) do produto	Tipo de Falha Potencial	Efeito de Falha Potencial	Causa da Falha em Potencial	Controles Atuais	Índices				Ações de Melhoria							
						S	O	D	R	Ações Recomendadas	Responsável/ Prazo	Medidas Implantadas	Índices Atuais				
													S	O	D	R	

Fonte: Rozenfeld et al., (2012)

Na análise de falhas são apontados os modos de falha, que é a maneira pela qual um item deixa de executar sua função, os efeitos da falha, que é a consequência da falha para o item ou sistema, e as causas da falha, que são os fatores que levam a falha como defeitos de projeto ou má utilização (GARRIDO, 2017).

Definidas as falhas a serem analisadas, são definidos os valores de Severidade, Ocorrência e Detectabilidade.

Para definir a severidade são utilizadas tabelas que definem gramaticalmente os riscos recorrentes de falhas, os Quadros 3 e 4 mostram exemplos de definições que podem ser utilizadas.

Quadro 3 - Exemplo 1 Avaliação de Severidade

EFEITO	CRITÉRIO	NOTA
Muito Alta	Severidade muito alta quando o tipo de falha afeta a segurança de operação do produto e/ou infringe leis ou regulamentações governamentais.	10 9
Alta	Produto deixa de funcionar. Grande descontentamento do cliente, porém sem afetar sua segurança ou Leis Governamentais	8 7
Moderado	Produto / item operável, porém com item(s) de conforto ou conveniência inoperante. Cliente descontente passa por experiências desconfortáveis.	6 5 4
Pequena	Produto / item operável, porém com item(s) de conforto ou conveniência operando com um nível reduzido ou ligeira deterioração no desempenho do produto. Cliente passa por algumas experiências insatisfatórias.	3 2
Mínima	O cliente mal percebe que a falha aconteceu. Defeito notado por uma minoria dos clientes. Itens de acabamento e redução de ruído não estão em conformidade.	1

Fonte: Manual de FMEA – QS 9000

Quadro 4 - Exemplo 2 Avaliação de Severidade

EFEITO	CRITÉRIO	NOTA
Perigoso Sem Advertência	Severidade muito alta quando o tipo de falha afeta a segurança de operação do veículo e/ou envolve desacordo com regulamentações governamentais. Sem advertência.	10
Perigoso Com Advertência	Severidade muito alta quando o tipo de falha afeta a segurança de operação do veículo e/ou envolve desacordo com regulamentações governamentais. Com advertência.	09
Muito Alto	Produto / item inoperante, com perda da função primária .	08
Alto	Veículo / item operável, porém com nível de performance reduzido. Cliente insatisfeito.	07
Moderado	Veículo / item operável, porém com item(s) de conforto ou conveniência inoperante. Cliente passa por experiências desconfortáveis.	06
Baixo	Veículo / item operável, porém com item(s) de conforto ou conveniência operando com um nível reduzido de performance. Cliente passa por algumas experiências insatisfatórias.	05
Muito Baixo	Defeito notado pela maior parte dos clientes. Itens de acabamento e redução de ruído não estão em conformidade.	04
Menor	Defeito notado pelo metade dos clientes. Itens de acabamento e redução de ruído não estão em conformidade.	03
Muito Menor	Defeito notado por uma minoria dos clientes. Itens de acabamento e redução de ruído não estão em conformidade.	02
Nenhum	SEM EFEITO	01

Fonte: Manual de FMEA – QS 9000

A definição de Ocorrência é a mais facilmente identificável dos critérios, uma vez que é classificada em número de ocorrências de falhas por situações em que estas falhas podem ocorrer, os valores podem ser quantificados criando intervalos bem definidos para a escala. O Quadro 5 mostra um exemplo de escala.

Quadro 5 - Exemplo Avaliação de Ocorrência

Probabilidade de Falha	Taxa de Falhas possíveis	Nota
Muito Alta: A falha é praticamente inevitável	\geq 1 em 2	10
	1 em 3	9
Alta: Falhas Frequentes	1 em 8	8
	1 em 20	7
Moderada: Falhas Ocasionais	1 em 80	6
	1 em 400	5
	1 em 2.000	4
Baixa: Relativamente Pouca Falha	1 em 15.000	3
	1 em 150.000	2
Remota: Falha Improvável	\leq 1 em 1.500.000	1

Fonte: Manual de FMEA – QS 9000

Os valores de taxas de falhas podem ser alterados conforme o projeto e o histórico de falhas de produtos similares feitos anteriormente.

Por fim, a detectabilidade mede como o programa de verificação do projeto é capaz de encontrar falhas no projeto independente de sua severidade. A definição de detectabilidade também não é facilmente definida uma vez que, assim como a severidade, é definida em termos gramaticais não havendo uma definição quantitativa para a análise. O Quadro 6 mostra um exemplo de critério de detecção (QIN; XI; PEDRYCZ, 2020).

Quadro 6 - Exemplo Avaliação de Detectabilidade

DETECÇÃO	CRITÉRIO: Probabilidade de Detecção Pelo Controle de Projeto	NOTA
Nula	O programa de verificação não detectará a falha	10
Muito Baixa	O programa de verificação provavelmente não detectará a falha	9 8
Moderada	O programa de verificação provavelmente detectará a falha	7 6 5
Alta	O programa de verificação tem grandes chances de detectar a falha	4 3
Muito Alta	O programa de verificação quase que certamente detectará a falha	2 1

Fonte: Manual de FMEA – QS 9000

O FMEA de projeto e o FMEA de processos, são as principais aplicações da ferramenta.

2.2.1 FMEA de processos

No FMEA de processos é analisado o processo produtivo do produto, são levantadas as falhas decorrentes na linha de produção de um produto contemplando a fabricação, montagem, transporte e demais processos existentes (FORD MOTOR COMPANY, 2004).

Para linhas de produção muito grandes, um FMEA de processo completo pode não ser viável uma vez que diversos processos com baixos riscos de falha podem estar presentes no processo, incluí-los retiraria o foco da análise nos maiores fatores de falha (FORD MOTOR COMPANY, 2004).

Portanto, o primeiro passo do FMEA de processos é filtrar as fases de produção para que a análise seja feita nas etapas mais importantes. No Quadro 7 tem-se um exemplo de avaliação de risco realizada para aplicação de cera no interior da porta de um veículo.

Quadro 7 - Avaliação do Risco de FMEA de Processo

Tarefa do Processo	Avaliação de Risco
1. Retirar o dispositivo do aplicador de cera do suporte	Baixo Risco
2. Abrir a porta do veículo	Baixo Risco
3. Inserir o dispositivo e puxar o gatilho por 12 Segundos *	Alto Risco
4. Soltar o gatilho e esperar 3 segundos	Médio Risco
5. Retirar dispositivo aplicador	Médio Risco
6. Fechar a porta do veículo	Baixo Risco
7. Recolocar o dispositivo do aplicador no suporte	Baixo Risco

Fonte: Manual de FMEA – QS 9000

Para o processo do Quadro 7 foi obtido um valor de risco alto para a tarefa de número 3, portanto, para essa tarefa será realizado o FMEA de processo onde serão apontadas e classificadas todas as falhas decorrentes.

Após apontadas as falhas, elas são classificadas de acordo com a sua severidade, ocorrência e detectabilidade na escala de 1 a 10 e seu RPN é calculado. Com os valores de RPN obtidos os fatores mais críticos são levantados e a equipe realiza alterações no processo para diminuir os fatores possíveis.

2.2.2 FMEA de projeto

O FMEA de projeto tem a mesma estrutura do FMEA de processos, porém é aplicado para identificação de falhas no produto antes desse vir a ser produzido em massa.

De acordo com o manual do FMEA da Ford Motor Company (2004) o primeiro passo para realização de um FMEA de projeto é escolher o que deve ser analisado e o que deve ser descartado da análise. Esta etapa visa diminuir o tamanho da análise focando-a onde o FMEA poderá diminuir o maior número de riscos.

Ainda segundo o manual, uma análise de FMEA ideal deve ser estável, isto é, mudanças feitas não devem influenciar outros parâmetros, ou a cada mudança o FMEA teria de ser refeito. Desafios podem ser encontrados durante o desenvolvimento de produtos requerendo novas versões, mas a estabilidade deve ser mantida sempre que possível.

O FMEA foi inicialmente desenvolvido para o projeto de novos produtos, mas devido a suas grandes aplicações, foi expandido para outras áreas sendo atualmente modelo desde processos industriais até processos administrativos (ROZENFELD et al., 2012).

A utilização da ferramenta do FMEA é de grande importância para o desenvolvimento de novos produtos uma vez que é um documento vivo que se desenvolve junto com o desenvolvimento do produto. Com o acompanhamento correto o FMEA pode mostrar o histórico de evolução do produto e como cada mudança feita repercute os riscos de falha (ROZENFELD et al., 2012).

Aplicar o FMEA pode ajudar a diminuir os custos de produção tanto pela rápida adaptação fornecida pela análise, como pela própria redução de falhas em testes realizados (ROZENFELD et al., 2012).

Além disso, o próprio consumidor final pode ter interesse nos testes de qualidade do produto, o FMEA pode apresentar a este consumidor informações importantes do desenvolvimento ganhando possivelmente sua confiança (ROZENFELD et al., 2012).

Apesar de suas vantagens, diversos autores apontam fraquezas no método FMEA tradicional.

Mangeli, Shahraki e Saljooghi (2019) consideram baixa a performance do FMEA por este ter classificações de riscos que podem variar significativamente de acordo com o ponto de vista de cada analista. Os exemplos nos quadros anteriores confirmam essa visão onde um critério gramaticalmente definido por alto ou moderado pode ter diferentes classificações variando de acordo com a definição de cada analista.

Hassan et al., (2022) consideram o FMEA tradicional como um método de fácil aplicação porém contendo diversas fraquezas que trazem resultados inconsistentes levando ao gasto de recursos em riscos incorretos.

Jianxing et al., (2021) também considera que o FMEA tradicional pode levar a resultados inadequados especialmente em projetos com grandes incertezas, para o caso deste estudo onde será trabalhado o desenvolvimento de novos produtos (ver seção 2.3), incertezas são constantes devido a baixa existência de projetos similares anteriores.

Muitas vezes a precisão do FMEA é limitada pelo conhecimento dos próprios especialistas que farão a análise de riscos (QIN; XI; PEDRYCZ, 2020). Portanto,

melhorias na ferramenta são desenvolvidas na literatura, visando aumentar a probabilidade de sucesso na identificação e priorização dos riscos das falhas envolvidas em projetos em desenvolvimento ou em processos.

2.2.3 Melhorias no FMEA

Em vista dos problemas evidenciados anteriormente, alterações no método do FMEA foram propostas para diminuir ou lidar melhor com os valores de incerteza presentes.

O *Fuzzy* FMEA, que é baseado em lógica difusa e é utilizado em aplicações onde as relações entre critérios não podem ser facilmente definidas, ou seja, o *Fuzzy* FMEA tem grande utilidade em aplicações que possam conter ideias ambíguas ou dados imprecisos para classificação dos indicadores de risco (MANGELI; SHAHRAKI; SALJOOGHI, 2019).

Com a utilização do *Fuzzy* FMEA, os elementos que geram o RPN e seus pesos relativos podem ser avaliados de maneira linguística, sem a atribuição numérica desenvolvida pelo especialista (LO; LIOU, 2018).

De acordo com Yener e Can (2021) a utilização da lógica difusa adiciona uma margem de hesitação para a análise de dados, uma vez que dados reais devem ter um nível de hesitação. Em seu trabalho foi aplicado um método de 3 etapas utilizando a lógica difusa para recalcular os pesos dos fatores de riscos obtendo um FMEA resultante mais detalhado que o tradicional.

Em seu estudo em uma linha de encanamento de petróleo, Hassan et al., (2022) utilizaram o *Fuzzy* FMEA juntamente com teoria cinzenta (do inglês *Grey theory*) e concluíram que devido à pequena quantidade de dados históricos, a utilização do *Fuzzy* FMEA foi de grande importância para a distribuição de pesos entre as escolhas de cada especialista de acordo com suas experiências na área.

O FMEA VIKOR (do Sérvio *Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*) é um método de decisão multicritério onde é feita a classificação e a seleção de um conjunto de alternativas na presença de critérios conflitantes (LO; LIOU, 2018).

Jianxing et al., (2021) utilizaram o método VIKOR estendido junto ao FMEA para análise de riscos de linhas de encanamento submarinas e concluíram que o índice de prioridade de riscos obtido estava próximo do ideal dada a importância de cada um deles.

Zhu et al., (2022) propuseram um novo método de decisão multicritério baseado em AHP (do inglês *Analytic Hierarchy Process*), *Rough number* e método VIKOR e o modelo obtido era capaz de revelar as incertezas e subjetividade no julgamento de cada especialista. Além disso, o método foi aplicado em um estudo de válvulas de retenção e foram observadas vantagens no método de avaliação de riscos quando comparado com o FMEA tradicional.

No Quadro 8 a seguir são resumidas as soluções sugeridas para os problemas apresentados.

Quadro 8 – Problemas e soluções sugeridas para o FMEA

Problemas e Limitações	Soluções sugeridas	Autores
Relações entre critérios não podem ser facilmente definidas	Utilização FMEA- <i>Fuzzy</i>	MANGELI; SHAHRAKI; SALJOOGHI, (2019)
Não utilização de atribuição linguística de pesos	Utilização FMEA- <i>Fuzzy</i>	LO; LIU, (2018)
Falta de um nível de hesitação	Utilização da lógica difusa	YENER; CAN, (2021)
Distribuição de pesos entre especialistas	Utilização FMEA- <i>Fuzzy</i> juntamente a <i>Grey theory</i>	HASSAN et al., (2022)
Revelar incertezas e subjetividade	Utilização do AHP, <i>Rough number</i> e VIKOR	ZHU et al., (2022) e JIANXING et al., (2022)

A utilização de um FMEA alternativo pode trazer uma maior confiabilidade em diferentes projetos. Na sequência é abordado o uso do FMEA no desenvolvimento de novos produtos, ressaltando a importância de sua implementação nos estágios iniciais de desenvolvimento.

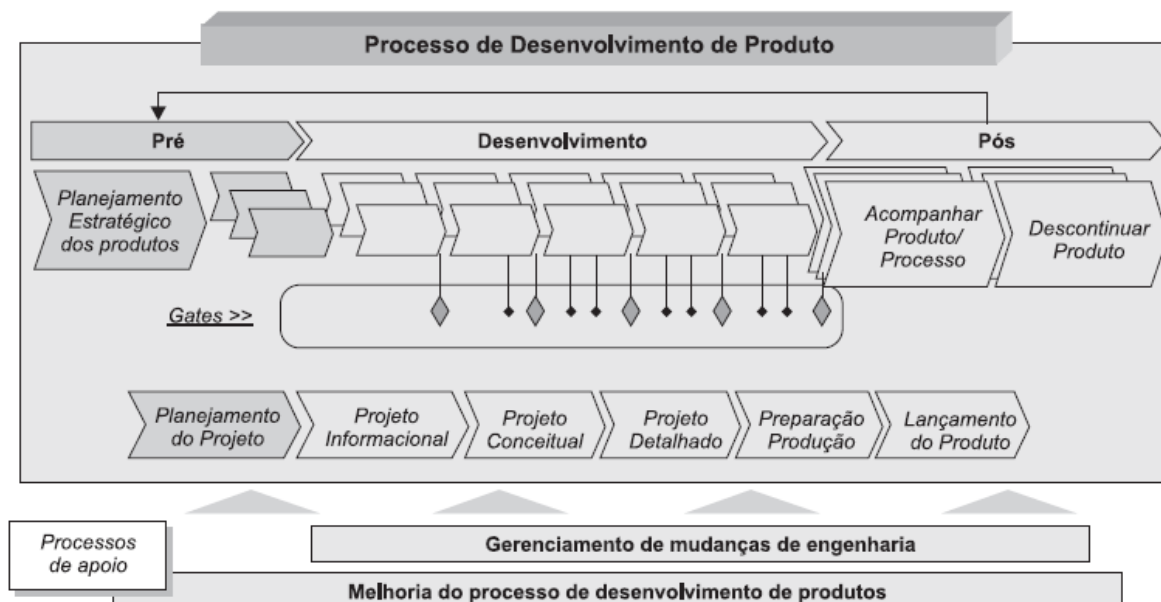
2.3 Desenvolvimento de novos produtos

Com o aumento da competição, empresas precisam cada vez mais reduzir seus tempos de produção e se adaptar as escolhas dos consumidores para obterem sucesso (OLIVEIRA; KAMINSKI, 2012).

Novos produtos têm ciclos de vida mais curtos e deixam produtos antigos obsoletos, segundo um estudo alemão o ciclo de vida de produtos diminuiu em 400% nos últimos 50 anos (COOPER, 2000).

Conforme a Figura 3, o processo de desenvolvimento de novos produtos possui três fases principais, o Pré-Desenvolvimento, Desenvolvimento e Pós-Desenvolvimento. O Pré-Desenvolvimento envolve o planejamento estratégico para produção do produto, enquanto que o Pós-Desenvolvimento foca em acompanhar a situação do produto no mercado (ROZENFELD et al., 2012).

Figura 3 - Processo de Desenvolvimento de Produto



Fonte: Rozenfeld et al., (2012)

A fase de Desenvolvimento é composta por cinco divisões sendo elas, projeto informacional, projeto conceitual, projeto detalhado, preparação para produção e lançamento do produto (ROZENFELD et al., 2012).

Na fase de projeto informacional criaram-se as especificações-meta do produto, enquanto que no projeto conceitual são estudadas soluções que atendam essas especificações. No projeto detalhado são definidas as especificações finais para a produção do protótipo, com o protótipo inicia-se a fase de preparação onde o produto é certificado e aprovado, e por fim o produto é lançado no mercado iniciando a fase de acompanhamento (ROZENFELD et al., 2012).

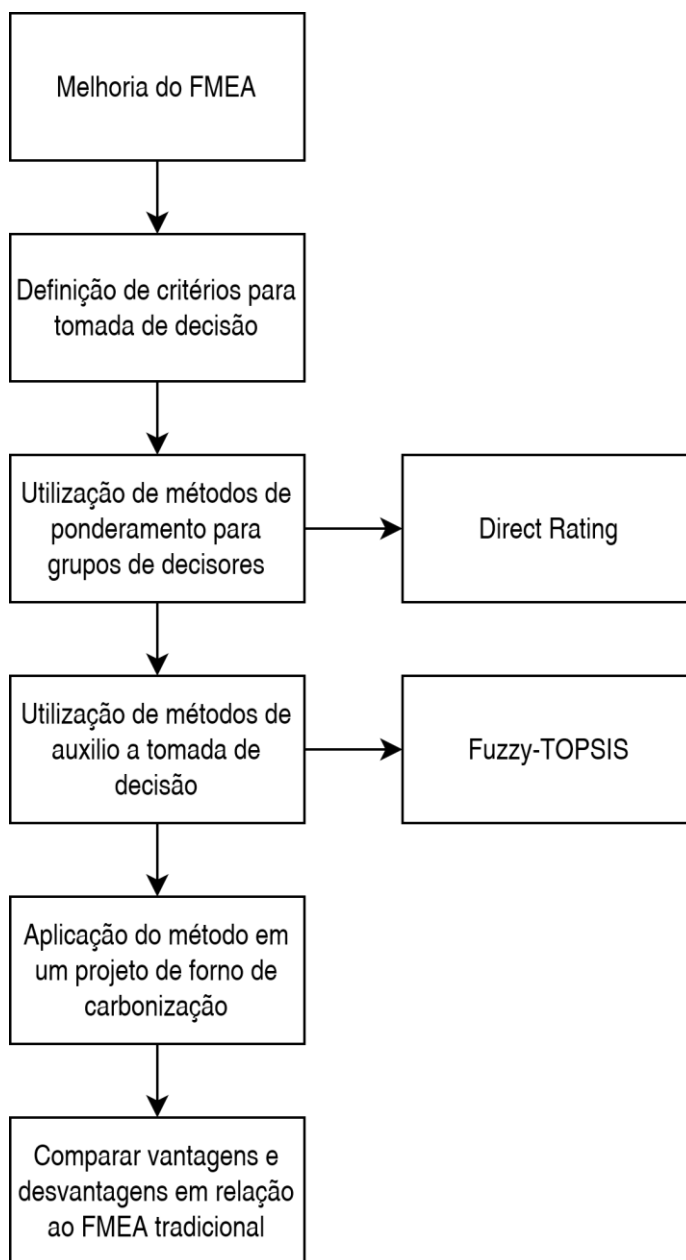
No desenvolvimento de novos produtos, profissionais de diversas áreas que possuem diferentes visões do produto, ideias e soluções apontadas nas fases iniciais são de grande importância para resolver problemas futuros que podem custar tempo e dinheiro dos desenvolvedores (ROZENFELD et al., 2012). O FMEA, portanto, como

uma ferramenta de análise dos modos e efeitos de falhas, permite apontar diversos problemas futuros (falhas potenciais em desenvolvimento) que podem vir a ser corrigidos antes mesmo do desenvolvimento do primeiro protótipo.

3 METODOLOGIA

Na Figura 4 estão descritas as etapas propostas para o desenvolvimento da melhoria do FMEA que foi aplicado no desenvolvimento de um projeto de forno de carbonização portátil.

Figura 4 - Etapas da metodologia



Fonte: Autoria própria

3.1 Critérios para tomada de decisão

O FMEA tradicional utiliza apenas severidade, ocorrência e detectabilidade, como critérios para definir os riscos de falha, focados principalmente na segurança (LO; LIOU, 2018).

Para verificação da necessidade de inserção de novos critérios relevantes no FMEA para desenvolvimento de novos produtos, foram analisadas pesquisas e trabalhos que visam a adaptação do método FMEA e observam vantagens explicitadas nos resultados destas pesquisas, com a adição de novos critérios.

Com o estudo de caso tratando-se de um novo produto para o mercado, foram levantados os critérios importantes para o sucesso do projeto, ausentes no FMEA tradicional.

3.2 Métodos de auxílio à tomada de decisão

Os métodos para auxílio à tomada de decisão definidos a seguir tem como objetivo diminuir a incerteza presente no FMEA tradicional sem adicionar um número excessivo de operações que dificultaria sua aplicação.

Para o desenvolvimento do método a ser aplicado, foi aplicada a lógica *fuzzy* no método de decisão, que auxilia no desenvolvimento de um FMEA mais confiável, pois mitiga as incertezas presentes (LO; LIOU, 2018).

Juntamente a lógica *fuzzy* foi aplicado o método de tomada de decisão TOPSIS (do inglês *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*). Desenvolvido por Hwang e Yoon (1981), TOPSIS é um método de tomada de decisão multicritério que avalia o desempenho de diferentes alternativas de acordo com a distância de cada uma delas em relação a uma solução ideal. Através do uso do método, é possível classificar cada alternativa de acordo com seu desempenho.

Ao unir os dois conceitos citados, Chen (2000) desenvolveu o método *Fuzzy-TOPSIS*, que ao invés de atribuir valores específicos para cada variável, atribui valores linguísticos, que podem ser mais facilmente determinados por seres humanos segundo ele.

Além do *Fuzzy-TOPSIS*, foi aplicado o método de ponderamento *Direct Rating* descrito a seguir para determinar os pesos de cada critério de acordo com a sua importância para ordenação dos riscos das falhas potenciais analisadas.

3.2.1 Método de ponderamento: *Direct Rating*

Direct Rating é um método de ponderamento subjetivo onde pesos são atribuídos a diversos critérios de acordo com a importância definida por um analista em uma escala numérica de 5, 10 ou até 100 pontos de acordo com a aplicação (DOYLE; GREEN; BOTTOMLEY, 1997).

Após a definição dos valores, seus pesos são normalizados criando uma nova escala, onde os pesos são comparados entre si gerando o grau de importância de cada critério para o projeto.

Neste trabalho o *Direct Rating* foi aplicado para os critérios definidos anteriormente a fim de ponderar-los de acordo com sua importância por pelo menos 3 especialistas na área, a fim de diminuir preferências pessoais e aumentar a confiabilidade dos resultados. Foi calculada a média geométrica para obtenção dos valores dos pesos agregados dos decisores.

3.2.2 Método de decisão: *Fuzzy-TOPSIS*

O método *Fuzzy-TOPSIS* desenvolvido por Chen (2000) tem o objetivo de retirar imprecisões presentes em análises com valores únicos definidos que segundo ele são inadequados para situações reais.

1º Etapa: É feita a matriz de decisão *fuzzy* normalizada onde A_1, A_2, \dots, A_m são as alternativas que o analista deve escolher, C_1, C_2, \dots, C_n são os critérios de análise onde a performance é medida, x_{mn} são os valores das variáveis normalizados e w_n são os pesos atrelados a cada variável.

Quadro 9 - Matriz de decisão fuzzy normalizada

Alternativa	Critério			
	C1	C2	...	Cn
A1	x11	x12	...	x1n
A2	x21	x22	...	x2n
...
Am	xm1	xm2	...	xmn
Wj	w1	w2	...	wn

Fonte: Adaptado de Chen (2000)

Onde x_{mn} e w_n são variáveis linguísticas indicadas por números triangulares fuzzy definidos pelo Quadro 10.

Quadro 10 - Variáveis linguísticas para o peso de importância de cada critério

Muito baixo	(0,0;0,0;0,1)
Baixo	(0,0;0,1;0,3)
Médio baixo	(0,1;0,3;0,5)
Médio	(0,3;0,5;0,7)
Médio alto	(0,5;0,7;0,9)
Alto	(0,7;0,9;1,0)
Muito Alto	(0,9;1,0;1,0)

Fonte: Adaptado de Chen (2000)

2° Etapa: São determinadas as soluções ideais A^* e A^- de acordo com os critérios:

$$A^* = (\tilde{v}_1^*, \tilde{v}_2^*, \dots, \tilde{v}_n^*) \text{ onde } \tilde{v}_j^* = (1,1,1)$$

$$A^- = (\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-) \text{ onde } \tilde{v}_j^- = (0,0,0)$$

3° Etapa: São determinadas as distâncias de cada alternativa em relação a solução ideal A^* e A^- :

$$d_i^* = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^*) \forall i$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) \forall i$$

$$\text{Sendo } d(m, n) = \sqrt{\frac{1}{3}[(a_m - a_n)^2 + (b_m - b_n)^2 + (c_m - c_n)^2]}$$

Com a , b e c sendo cada um dos valores *fuzzy* triangulares obtidos na matriz

4° Etapa: Por fim é determinado coeficiente de proximidade relativa Q_i definido por

$$Q_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^*}$$

3.3 Aplicação no estudo de caso

Para validação do método, este foi aplicado no projeto de desenvolvimento de fornos de carbonização transportáveis, proposto por Biscaia (2021), onde foi aplicado o FMEA e foram obtidos valores de RPN em falhas potenciais que representam diferentes riscos dos projetos de fornos de carbonização de carvão vegetal, desenvolvidos.

Em seu trabalho, Biscaia (2021) visa reduzir os custos de transporte de matéria-prima para produção de carvão vegetal com o deslocamento existente entre a coleta de madeira nas florestas e as praças de fabricação de carvão vegetal por meio do desenvolvimento de um forno transportável que atuaria próximo a fonte de matéria. O projeto prevê não apenas uma redução no custo relacionado ao transporte, mas também um aumento na eficiência da coleta devido a umidade presente na madeira que não será perdida.

O novo método baseado no método Fuzzy-TOPSIS com a adição de critérios importantes no ramo de desenvolvimento de novos produtos e ponderamento de critérios tem como objetivo desempatar os valores de RPN obtidos no projeto assim como classificá-los em uma nova ordem de prioridade de acordo com as falhas presentes no desenvolvimento de novos produtos e os riscos de operação e transporte do forno de carbonização.

Após a aplicação do novo método, este foi comparado com o FMEA tradicional, aplicado no trabalho de Biscaia (2021) para que sejam apontadas vantagens e desvantagens, assim como as variações nas prioridades de riscos das falhas potenciais obtidas com a nova abordagem.

Os modos de falhas definidos por Biscaia (2021) não foram reavaliados, permitindo assim um comparativo direto e mais preciso de cada modo de falha analisado pelas duas ferramentas distintas.

O Quadro 11 resume as melhorias que se pretende desenvolver para o FMEA aplicado no desenvolvimento de novos produtos.

Quadro 11 - Resumo das melhorias propostas pelo método FMEA aplicado no desenvolvimento de novos produtos

Limitações no FMEA Tradicional	Melhorias do FMEA em desenvolvimento
Valores de RPN empatam entre riscos diferentes (JIN; RAN; ZHANG, 2021)	Aplicação do método de decisão <i>Fuzzy-TOPSIS</i> para ordenação dos RPNs
Não existe a possibilidade de priorizar critérios para o cálculo do RPN (QIN; XI; PEDRYCZ, 2020)	Aplicação do método <i>Direct Rating</i> para definição de pesos dos critérios
Critérios são limitados a Ocorrência, Detectabilidade e Severidade (MZOUGUI; FELSOUFI, 2019)	Adição de custos e manutenibilidade como critérios para a análise
Não considera a agregação de avaliações de diferentes decisores para o ponderamento e ranqueamento (MZOUGUI; FELSOUFI, 2019)	Utilização de um mínimo de 3 analistas para minimizar preferências pessoais

Fonte: Autoria própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apontados os resultados da aplicação dos procedimentos utilizados para a análise de falhas do projeto de forno de carbonização transportável através do novo método proposto. É elaborada a definição de critérios adicionais para tomada de decisão em um modelo desenvolvimento de novos produtos. São descritas as etapas de ponderamento e aplicação do método de tomada de decisão associado à ferramenta FMEA. Também é desenvolvida uma comparação com os resultados obtidos com o método proposto nesta pesquisa em relação ao que foi obtido por Biscaia (2021). Por fim, são identificadas as vantagens e limitações do método proposto.

4.1 Definição de critérios adicionais para tomada de decisão

Além dos 3 critérios originais definidos no FMEA tradicional para o cálculo do RPN, para esta análise foram adicionados outros dois critérios. Os critérios adicionais descritos a seguir são definidos de acordo com os principais problemas recorrentes no ramo de desenvolvimento de novos produtos.

O primeiro critério adicional, também utilizado por Braglia (2000) em sua análise de falhas de múltiplos atributos (MAFMA) é o custo. Segundo Rozenfeld (2012) a eficiência no desenvolvimento de novos produtos está atrelada a atingir os resultados esperados utilizando o mínimo de recursos como tempo e custos para o desenvolvimento.

Mzougui e Felsoufi (2019) utilizaram o percentual de custo da falha para o orçamento total do projeto como fator para definir o valor de custo na escala. Já Jin, Ran e Zhang (2021) também utilizaram o custo em sua análise FMEA subdividindo-o em três categorias, sendo elas: Custo de análise de falhas, custo de detecção de falhas e custo de reparo de falhas.

Portanto, conforme verificado, o custo é um critério relevante e que pode ser discriminado durante a etapa de estabelecimento do RPN. O custo para o método proposto é definido como o valor a ser utilizado para a correção de cada método de falha potencial apresentado no FMEA.

Para o segundo critério será apontada a manutenibilidade de falhas. A manutenibilidade é medida de acordo com o tempo que será necessário para correção de uma falha e nível técnico necessário para correção (MZOUGUI; FELSOUFI, 2019). Jianxing et al., (2021) utilizaram a manutenibilidade como o quarto fator de análise em seu FMEA baseado no método VIKOR e definiram como subcritérios a eficiência econômica e dificuldades técnicas. Logo, definiu-se a manutenibilidade como um critério que mensura a eficiência e capacidade de desenvolver a manutenção no caso de uma falha potencial.

4.2 Aplicação do método de ponderamento (*Direct Rating*)

O ponderamento foi realizado utilizando os critérios apontados no FMEA tradicional e consultando três diferentes especialistas na área para ponderarem em uma escala de 1 a 10 a importância de cada um dos métodos de falha.

A consulta foi feita através do questionário presente no Apêndice A onde os especialistas foram perguntados sobre a importância de cada critério no desenvolvimento de um novo produto.

Após a coleta dos valores, estes foram normalizados individualmente, e por fim agregados entre si para a obtenção dos pesos a serem utilizados. Estes resultados podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 - Pesos *Direct Rating*

Direct Rating	Severidade	Ocorrência	Detectabilidade	Custo	Manutenibilidade
Decisor 1	10	4	8	7	5
Pesos Decisor 1	0,294	0,118	0,235	0,206	0,147
Decisor 2	8	7	10	10	10
Pesos Decisor 2	0,178	0,156	0,222	0,222	0,222
Decisor 3	10	6	10	7	5
Pesos Decisor 3	0,263	0,158	0,263	0,184	0,132
Pesos agregados	0,245	0,144	0,240	0,204	0,167

Fonte: Autoria própria

Verifica-se que de acordo com os pesos agregados obtidos, a severidade do modo de falha foi considerado o critério de maior relevância para o processo decisório. Tal fator é corroborado por Lo e Liou (2018) que evidenciaram em sua pesquisa a importância do critério descrito quando comparado a detectabilidade, ocorrência e custo.

Outro ponto que pode ser analisado é de que o custo e a manutenibilidade assumiram níveis de importância maiores que a probabilidade de ocorrência. Fator que corrobora com a ação e proposta deste método em inserir os dois critérios citados à metodologia de cálculo da prioridade dos riscos dos modos de falha.

4.3 Aplicação do método de tomada de decisão *Fuzzy-TOPSIS*

Para a aplicação do método de tomada de decisão foram definidos os 27 modos potenciais de falha presentes no Quadro 12 obtidos a partir do FMEA tradicional desenvolvido no trabalho de Biscaia (2021), cada um deles foi avaliado em 5 diferentes critérios de falha, sendo 3 deles os critérios presentes no FMEA tradicional (Severidade, Ocorrência e Detectabilidade) e os 2 adicionais do método proposto (Custos e Manutenibilidade).

Cada um dos critérios foi avaliado pelo autor do projeto utilizando as variáveis linguísticas presentes no Quadro 10. Esta avaliação está apresentada no Quadro 13.

Quadro 12 - Modos de falhas

Mx	Modo de falha
M1	Vazamento na tubulação
M2	Obstrução da tubulação
M3	Válvula não veda totalmente na posição fechada
M4	Travamento da válvula borboleta na posição totalmente fechada
M5	Travamento da válvula borboleta na posição totalmente aberta
M6	Deslocamento da base do elevador durante operações (base mal fixada)
M7	Travamento na catraca de acionamento manual do elevador
M8	Deformação ou falha nas engrenagens do elevador
M9	Deformação das vigas
M10	Deformação da estrutura
M11	Oxidação e corrosão da estrutura
M12	Quebra de uniões soldadas
M13	Deformação da estrutura
M14	Oxidação e corrosão da estrutura
M15	Quebra de uniões soldadas
M16	Travamento da porta
M17	Vazamento de ar para o interior do forno em situação que a porta permanece totalmente fechada
M18	Elevação da temperatura na parede externa do forno
M19	Deformação da porta
M20	Quebra das dobradiças (sistema de abertura)
M21	Vazamento nas regiões do forno com vedação
M22	Perda de calor nas regiões do forno com vedação
M23	Quebra de parafusos
M24	Oxidação e corrosão dos parafusos e porcas
M25	Má fixação de regiões parafusadas
M26	Baixa qualidade do carvão produzido
M27	Dificuldade de manutenção do forno entre carbonizações

Fonte: Autoria própria

Quadro 13 - Avaliação Fuzzy

Item	Modo de falha	Severidade (Fuzzy)	Ocorrência (Fuzzy)	Detectabilidade (Fuzzy)	Custos (Fuzzy)	Mantenabilidade
Tubulação	M1	Médio baixo	Baixo	Muito baixo	Médio baixo	Médio
	M2	Médio baixo	Médio baixo	Médio	Médio	Médio alto
Válvula de controle de vazão	M3	Médio baixo	Médio baixo	Baixo	Médio	Médio
	M4	Médio alto	Médio baixo	Muito baixo	Médio	Alto
	M5	Médio baixo	Médio baixo	Muito baixo	Médio	Médio
Elevadores	M6	Muito alto	Baixo	Médio	Muito alto	Médio alto
	M7	Muito alto	Muito baixo	Alto	Médio alto	Médio
	M8	Alto	Muito baixo	Alto	Médio alto	Médio
Estrutura de suporte do forno	M9	Médio alto	Baixo	Baixo	Muito alto	Baixo
Estrutura externa - carcaça do forno	M10	Médio	Muito baixo	Baixo	Muito alto	Baixo
	M11	Médio	Médio	Baixo	Médio	Médio
	M12	Baixo	Alto	Baixo	Médio baixo	Médio baixo
Estrutura interna metálica	M13	Médio	Baixo	Médio baixo	Alto	Médio baixo
	M14	Médio baixo	Médio baixo	Médio baixo	Médio alto	Médio baixo
	M15	Baixo	Médio	Médio baixo	Médio	Médio
Portas em formato de guilhotinas	M16	Médio baixo	Baixo	Muito baixo	Baixo	Muito baixo
	M17	Médio baixo	Médio baixo	Baixo	Baixo	Baixo
Isolante térmico	M18	Alto	Alto	Baixo	Muito alto	Muito alto
Porta do forno	M19	Médio baixo	Baixo	Baixo	Médio baixo	Médio
	M20	Médio baixo	Baixo	Muito baixo	Baixo	Baixo
Vedação	M21	Médio baixo	Médio	Médio baixo	Baixo	Médio baixo
	M22	Médio baixo	Médio	Médio	Baixo	Médio
Sistema de fixação parafusada	M23	Baixo	Baixo	Baixo	Muito baixo	Baixo
	M24	Baixo	Alto	Médio	Muito baixo	Baixo
	M25	Baixo	Médio alto	Alto	Baixo	Médio baixo
Forno de carbonização	M26	Alto	Baixo	Médio baixo	Muito alto	Muito alto
	M27	Médio alto	Baixo	Alto	Alto	Muito alto

Fonte: Autoria própria

Cada um dos valores linguísticos foi então convertido para os números *fuzzy* triangulares definidos no Quadro 10. Esta transformação é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Números triangulares *Fuzzy*

Modo de falha	Severidade (<i>Fuzzy</i>)	Ocorrência (<i>Fuzzy</i>)	Detectabilidade (<i>Fuzzy</i>)	Custos (<i>Fuzzy</i>)	Mantenabilidade (<i>Fuzzy</i>)
M1	(0,1;0,3;0,5)	(0,0;0,1;0,3)	(0,0;0,0;0,1)	(0,1;0,3;0,5)	(0,3;0,5;0,7)
M2	(0,1;0,3;0,5)	(0,1;0,3;0,5)	(0,3;0,5;0,7)	(0,3;0,5;0,7)	(0,5;0,7;0,9)
M3	(0,1;0,3;0,5)	(0,1;0,3;0,5)	(0,0;0,1;0,3)	(0,3;0,5;0,7)	(0,3;0,5;0,7)
M4	(0,5;0,7;0,9)	(0,1;0,3;0,5)	(0,0;0,0;0,1)	(0,3;0,5;0,7)	(0,7;0,9;1,0)
M5	(0,1;0,3;0,5)	(0,1;0,3;0,5)	(0,0;0,0;0,1)	(0,3;0,5;0,7)	(0,3;0,5;0,7)
M6	(0,9;1,0;1,0)	(0,0;0,1;0,3)	(0,3;0,5;0,7)	(0,9;1,0;1,0)	(0,5;0,7;0,9)
M7	(0,9;1,0;1,0)	(0,0;0,0;0,1)	(0,7;0,9;1,0)	(0,5;0,7;0,9)	(0,3;0,5;0,7)
M8	(0,7;0,9;1,0)	(0,0;0,0;0,1)	(0,7;0,9;1,0)	(0,5;0,7;0,9)	(0,3;0,5;0,7)
M9	(0,5;0,7;0,9)	(0,0;0,1;0,3)	(0,0;0,1;0,3)	(0,9;1,0;1,0)	(0,0;0,1;0,3)
M10	(0,3;0,5;0,7)	(0,0;0,0;0,1)	(0,0;0,1;0,3)	(0,9;1,0;1,0)	(0,0;0,1;0,3)
M11	(0,3;0,5;0,7)	(0,3;0,5;0,7)	(0,0;0,1;0,3)	(0,3;0,5;0,7)	(0,3;0,5;0,7)
M12	(0,0;0,1;0,3)	(0,7;0,9;1,0)	(0,0;0,1;0,3)	(0,1;0,3;0,5)	(0,1;0,3;0,5)
M13	(0,3;0,5;0,7)	(0,0;0,1;0,3)	(0,1;0,3;0,5)	(0,7;0,9;1,0)	(0,1;0,3;0,5)
M14	(0,1;0,3;0,5)	(0,1;0,3;0,5)	(0,1;0,3;0,5)	(0,5;0,7;0,9)	(0,1;0,3;0,5)
M15	(0,0;0,1;0,3)	(0,3;0,5;0,7)	(0,1;0,3;0,5)	(0,3;0,5;0,7)	(0,3;0,5;0,7)
M16	(0,1;0,3;0,5)	(0,0;0,1;0,3)	(0,0;0,0;0,1)	(0,0;0,1;0,3)	(0,0;0,0;0,1)
M17	(0,1;0,3;0,5)	(0,1;0,3;0,5)	(0,0;0,1;0,3)	(0,0;0,1;0,3)	(0,0;0,1;0,3)
M18	(0,7;0,9;1,0)	(0,7;0,9;1,0)	(0,0;0,1;0,3)	(0,9;1,0;1,0)	(0,9;1,0;1,0)
M19	(0,1;0,3;0,5)	(0,0;0,1;0,3)	(0,0;0,1;0,3)	(0,1;0,3;0,5)	(0,3;0,5;0,7)
M20	(0,1;0,3;0,5)	(0,0;0,1;0,3)	(0,0;0,0;0,1)	(0,0;0,1;0,3)	(0,0;0,1;0,3)
M21	(0,1;0,3;0,5)	(0,3;0,5;0,7)	(0,1;0,3;0,5)	(0,0;0,1;0,3)	(0,1;0,3;0,5)
M22	(0,1;0,3;0,5)	(0,3;0,5;0,7)	(0,3;0,5;0,7)	(0,0;0,1;0,3)	(0,3;0,5;0,7)
M23	(0,0;0,1;0,3)	(0,0;0,1;0,3)	(0,0;0,1;0,3)	(0,0;0,0;0,1)	(0,0;0,1;0,3)
M24	(0,0;0,1;0,3)	(0,7;0,9;1,0)	(0,3;0,5;0,7)	(0,0;0,0;0,1)	(0,0;0,1;0,3)
M25	(0,0;0,1;0,3)	(0,5;0,7;0,9)	(0,7;0,9;1,0)	(0,0;0,1;0,3)	(0,1;0,3;0,5)
M26	(0,7;0,9;1,0)	(0,0;0,1;0,3)	(0,1;0,3;0,5)	(0,9;1,0;1,0)	(0,9;1,0;1,0)
M27	(0,5;0,7;0,9)	(0,0;0,1;0,3)	(0,7;0,9;1,0)	(0,7;0,9;1,0)	(0,9;1,0;1,0)

Fonte: Autoria própria

Definidos os valores triangulares de cada modo de falha, estes foram multiplicados pelo respectivo peso de importância do critério obtido pelo método de ponderamento (Tabela 3).

Em sequência são determinadas as soluções ideais e anti-ideais de cada um dos modos de falha, sendo 1 para as soluções ideais e 0 para as soluções anti-ideais para todas as falhas dado o critério inicial utilizado para análise.

Por fim, obtidas as soluções ideais e anti-ideais, a soma das soluções anti-ideais de cada modo de falha foi dividida pelo valor das somas ideais e anti-ideais, obtendo assim o RPN final presente a seguir na Tabela 3.

Tabela 3 - RPN Fuzzy

Falha	RPN Fuzzy	Ranking
M1	0,09151676	23
M2	0,15181773	7
M3	0,11879969	17
M4	0,15162883	8
M5	0,10958946	18
M6	0,20752469	3
M7	0,20378413	4
M8	0,19918754	6
M9	0,14443406	10
M10	0,12583268	16
M11	0,13926947	12
M12	0,10864604	19
M13	0,14690038	9
M14	0,13257871	13
M15	0,12616824	15
M16	0,05701035	26
M17	0,08060022	24
M18	0,21656058	2
M19	0,10088301	22
M20	0,06376321	25
M21	0,10848829	20
M22	0,13003944	14
M23	0,05273017	27
M24	0,10716606	21
M25	0,14003638	11
M26	0,20065112	5
M27	0,22085673	1

Fonte: Autoria própria

Com a obtenção dos valores podemos observar M27 (Dificuldade de manutenção do forno entre carbonizações) e M18 (Elevação da temperatura na parede externa do forno) como os modos de falha de maior risco devido aos altos valores de severidade assim como avaliações altas nos critérios adicionais de custos e manutenibilidade.

M6 (Deslocamento da base do elevador durante operações) e M7 (Travamento na catraca de acionamento manual do elevador) são caracterizados como os modos

de falha com o maior valor de severidade vem em sequência mostrando a importância deste critério para a análise no *Ranking* final.

Os critérios M23 (Quebra de parafusos) e M16 (Travamento da porta) foram os de menor risco por seguirem o oposto dos valores citados anteriormente, obtendo pontuações baixas nos critérios originais e avaliações baixas nos novos critérios.

4.4 Comparações

Na Tabela 4 pode ser observada a diferença nos valores de RPN obtidos com o método proposto e o FMEA tradicional realizado no trabalho de Biscaia (2021).

Tabela 4 - Comparações RPN

Falha	RPN <i>Fuzzy</i>	<i>Ranking Fuzzy</i>	RPN FMEA tradicional	<i>Ranking FMEA tradicional</i>	Variação <i>Ranking</i>
M1	0,09151676	23	8	25	2
M2	0,15181773	7	80	7	0
M3	0,11879969	17	32	18	1
M4	0,15162883	8	24	20	12
M5	0,10958946	18	16	22	4
M6	0,20752469	3	120	1	-2
M7	0,20378413	4	56	12	8
M8	0,19918754	6	56	12	6
M9	0,14443406	10	36	17	7
M10	0,12583268	16	10	24	8
M11	0,13926947	12	50	14	2
M12	0,10864604	19	42	15	-4
M13	0,14690038	9	40	16	7
M14	0,13257871	13	64	10	-3
M15	0,12616824	15	60	11	-4
M16	0,05701035	26	8	25	-1
M17	0,08060022	24	32	18	-6
M18	0,21656058	2	98	3	1
M19	0,10088301	22	16	22	0
M20	0,06376321	25	8	25	0
M21	0,10848829	20	80	7	-13
M22	0,13003944	14	100	2	-12
M23	0,05273017	27	18	21	-6
M24	0,10716606	21	70	9	-12
M25	0,14003638	11	84	4	-7
M26	0,20065112	5	84	4	-1
M27	0,22085673	1	84	4	3

Fonte: Autoria própria

Primeiramente, pode ser observada uma grande queda na importância dos modos de falha M21, M22, M24 e M25 que tratam-se de critérios com um RPN

tradicional alto devido a multiplicação de valores mas contendo valores de severidade baixos que baixam sua importância no FMEA proposto devido ao método ponderamento aplicado onde a severidade tem um peso de importância maior que os demais critérios.

O inverso pode ser observado nos critérios M4, M7 e M8. Em M4 uma severidade de 6 é acompanhada de notas baixas dos outros critérios que quando multiplicadas resultam em um RPN que desconsidera o risco presente em caso de falha. Os critérios M7 e M8 possuem severidade e detecção altas acompanhados de uma ocorrência 1 relevando seus riscos, no FMEA proposto a detecção vem logo após a severidade em importância elevando assim a posição de uma falha que contenha os dois valores elevados apesar de uma ocorrência baixa que não tem o mesmo grau de importância.

Quanto à adição dos novos critérios para análise, pode-se observar um grande aumento no ranking de importância de M9 e M10 onde devido ao valor de custo classificado como “Muito Alto”, somado a classificação intermediária dos custos no método de ponderamento, aumentou seu fator de risco. Já M23 e M24 tiveram significativas quedas de importância após a avaliação baixa de custo e manutenibilidade.

Demais critérios tiveram alterações de importância não tão significativas por acompanharem custos e manutenibilidade com importância similar aos outros critérios.

Para os empates duplos e triplos de RPN obtidos pelo FMEA tradicional, todos foram sanados com valores como M1, M16, M20 e M5, M6 permanecendo próximos e outros como M2, M21 e M25, M26, M27 tiveram seus valores finais distribuídos pela avaliação.

Portanto observam-se as seguintes vantagens do método proposto quando comparado ao FMEA tradicional:

- A utilização do método de ponderamento *Direct Rating* auxilia na definição de riscos de acordo com os problemas presentes em cada projeto.
- A adição de novo critérios expande a avaliação para outras áreas de risco do projeto desconsideradas pelo FMEA tradicional que tem no foco a segurança

- Os valores de RPN tem classes de grandeza próximas gerando comparações mais simples ao contrário da natureza multiplicativa do FMEA tradicional podendo resultar em valores fora de escala
- Devido a presença de mais decisores realizando o ponderamento preferências pessoais são melhor distribuídas
- A existência de pesos entre diferentes critérios reduz drasticamente a probabilidade de um empate de RPNs

Apesar das vantagens obtidas, o método apresenta limitações quanto a sua aplicação. A obtenção de dados deve ser feita por diversas pessoas que tenham conhecimento do projeto em desenvolvimento. Fator que pode limitar a qualidade dos dados obtidos quando o acesso às informações é limitado.

O método proposto é mais complexo, se comparado ao cálculo do RPN proposto pelo método tradicional. Além disso, a existência de diversos passos para resolução pode aumentar a probabilidade de erros resultando em conclusões incorretas.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho são evidenciados problemas existentes no método de análise de falhas FMEA e foram feitas adaptações ao método de modo a torná-lo uma ferramenta mais robusta para análise de falhas quando aplicado ao desenvolvimento de novos produtos.

A aplicação do método de ponderamento *Direct Rating* juntamente ao método de decisão *Fuzzy-TOPSIS* auxiliou na distribuição de incertezas existentes em uma avaliação de riscos além de apontar os locais de maior importância para realização do projeto.

A adição dos novos critérios de falha trouxe aspectos de grande importância no desenvolvimento de novos produtos, expandindo a avaliação em critérios relacionados ao custo e a manutenibilidade, que eram desconsiderados, ou eram intrínsecos aos critérios tradicionais, utilizados para o cálculo de RPN.

O método sugerido foi aplicado ao projeto de Biscaia (2021). Os modos de falha com avaliações altas em critérios críticos subiram no *Ranking* geral de importância, assim como modos de falha com alto custo e manutenibilidade que não são abordados no método tradicional. Demais modos de falha mantiveram-se próximos a avaliação tradicional mostrando uma correlação entre as análises.

O método proposto eliminou os empates entre os valores de RPN, que ocorreram na avaliação realizada por Biscaia (2021), trazendo assim uma análise mais precisa dos modos de falhas mais críticos e que exigem ações mais urgentes e relevantes na etapa de desenvolvimento do produto.

Apesar da dificuldade de implantação, que exige uma pesquisa por diversos especialistas e agregação de dados, o método proposto contribui para uma análise mais precisa de potenciais modos de falhas existentes em projetos de produtos em desenvolvimento, evidenciando problemas específicos de acordo com a natureza e diferentes riscos de cada projeto.

Foi desenvolvido um artigo científico, baseado no presente trabalho de conclusão de curso e foi submetido e aprovado no XII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção (ConBRepro) com apresentação a ser realizada no início de dezembro. A primeira página do artigo aprovado pode ser visualizada no Apêndice B.

REFERÊNCIAS

- BISCAIA, R. V. B. METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DE PROJETO DE FORNO DE CARBONIZAÇÃO TRANSPORTÁVEL. p. 199, 2021.
- BRAGLIA, M. (2000), "MAFMA: multi-attribute failure mode analysis", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 17 No. 9, pp. 1017-1033.
<https://doi.org/10.1108/02656710010353885>
- CAMPOS, T. D. MÉTODOS E FERRAMENTAS DA QUALIDADE UTILIZADOS NAS EMPRESAS DO RAMO AUTOMOTIVO DE CURITIBA. p. 65, 2014.
- CAMPOS, V. F. Gerenciamento da rotina do trabalho do dia a dia. p. 241, 2013.
- CHEN, C.-T. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 114, n. 1, p. 1–9, ago. 2000.
- COOPER, Robert G. Doint it Right: Winning with New Products. *Ivey Business Journal*, 2000
- DOYLE, J. R.; GREEN, R. H.; BOTTOMLEY, P. A. Judging Relative Importance: Direct Rating and Point Allocation Are Not Equivalent. **Organizational Behavior and Human Decision Processes**, v. 70, n. 1, p. 65–72, abr. 1997.
- FORD, M. C. (2004), *Failure Mode and Effects Analysis: FMEA Handbook (with Robustness Linkages)*, 4.1 ed.
- FORNAZARI, D. M. MANUTENÇÃO INDUSTRIAL – ANÁLISE E CONSTRUÇÃO DA ÁRVORE DE FALHAS (FTA) DE UM COMPRESSOR GA 75 W ATLAS COPCO APLICADO NA INDÚSTRIA. p. 81, 2018.
- GARRIDO, R. L. F. CONFIABILIDADE E MANUTENÇÃO: UM ESTUDO SOBRE A TÉCNICA DA FMEA. p. 100, 2017.
- GRANERO, J. C. APLICAÇÃO DO CLICO PDCA EM UM PRODUTO ALIMENTÍCIO. p. 36, 2014.
- HASSAN, S. et al. Modified FMEA hazard identification for cross-country petroleum pipeline using Fuzzy Rule Base and approximate reasoning. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 74, p. 104616, jan. 2022.
- HWANG, CL., YOON, K. (1981). Methods for Multiple Attribute Decision Making. In: *Multiple Attribute Decision Making. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, vol 186. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3
- JIANXING, Y. et al. Risk assessment of submarine pipelines using modified FMEA approach based on cloud model and extended VIKOR method. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 155, p. 555–574, nov. 2021.
- JIN, C.; RAN, Y.; ZHANG, G. Interval-valued q-rung orthopair fuzzy FMEA application to improve risk evaluation process of tool changing manipulator. **Applied Soft Computing**, v. 104, p. 107192, jun. 2021.
- LO, H.-W. et al. A novel failure mode and effect analysis model for machine tool risk

analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 183, p. 173–183, mar. 2019.

LO, H.-W.; LIOU, J. J. H. A novel multiple-criteria decision-making-based FMEA model for risk assessment. **Applied Soft Computing**, v. 73, p. 684–696, dez. 2018.

MANGELI, M.; SHAHRAKI, A.; SALJOOGHI, F. H. Improvement of risk assessment in the FMEA using nonlinear model, revised fuzzy TOPSIS, and support vector machine. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 69, p. 209–216, jan. 2019.

MZOUGUI, I.; FELSOUFI, Z. E. Proposition of a modified FMEA to improve reliability of product. **Procedia CIRP**, v. 84, p. 1003–1009, 2019.

OLIVEIRA, A. C. DE; KAMINSKI, P. C. A reference model to determine the degree of maturity in the product development process of industrial SMEs. **Technovation**, v. 32, n. 12, p. 671–680, dez. 2012.

PRÁ, E. DE B. A MANUTENÇÃO INDUSTRIAL SOB A PERSPECTIVA DA MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE (MCC) EM UMA EMPRESA DA ÁREA DE COMPRESSORES HERMÉTICOS. p. 72, 2010.

QIN, J.; XI, Y.; PEDRYCZ, W. Failure mode and effects analysis (FMEA) for risk assessment based on interval type-2 fuzzy evidential reasoning method. **Applied Soft Computing**, v. 89, p. 106134, abr. 2020.

ROZENFELD, H. et al. **Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo: Editora Saraiva, 2012.

SCHEFFER, G. K. ANÁLISE DO PROBLEMA COM UMA FITA ALUMÍNIO NA MONTAGEM DE UMA CAIXA FREEZER: UM ESTUDO DE CASO. p. 42, 2018.

SELLA, B. C. COMPARATIVO ENTRE AS TÉCNICAS DE ANÁLISE DE RISCOS APR E HAZOP. p. 50, 2014.

YENER, Y.; CAN, G. F. A FMEA based novel intuitionistic fuzzy approach proposal: Intuitionistic fuzzy advance MCDM and mathematical modeling integration. **Expert Systems with Applications**, v. 183, p. 115413, nov. 2021.

ZHU, G.-N.; MA, J.; HU, J. A fuzzy rough number extended AHP and VIKOR for failure mode and effects analysis under uncertainty. **Advanced Engineering Informatics**, v. 51, p. 101454, jan. 2022.

APÊNDICE A - Formulário para definição do critério de ponderamento *Direct Rating*

Ponderamento FMEA forno de carbonização transportável

Este formulário tem como objetivo definir a importância de diferentes critérios em um projeto de forno de carbonização transportável para futura aplicação em uma adaptação do método FMEA aplicado ao desenvolvimento de novos produtos.

*Obrigatório

INSTRUÇÕES:

Considerando a aplicação do FMEA no desenvolvimento de um novo produto: Forno de Carbonização Transportável; julgue os 5 critérios a seguir de acordo com a sua importância em relação à avaliação dos riscos de uma falha potencial do projeto em desenvolvimento.

Considere 1 quando o critério tiver a mínima importância para análise dos riscos de falhas potenciais de um produto em desenvolvimento;

Considere 10 quando o critério tiver a máxima importância para análise dos riscos de falhas potenciais de um produto em desenvolvimento.

Os principais exemplos de falhas potenciais do projeto que serão classificadas de acordo com os critérios são:

- Vazamento e obstrução da Tubulação
- Travamento da válvula de controle de gases
- Deslocamento da base
- Deformação das engrenagens, vigas e estruturas
- Oxidação e corrosão
- Quebra de soldas
- Vazamento de ar para o interior do forno
- Elevação da temperatura externa ao forno
- Perda de calor
- Quebra de parafusos
- Dificuldade de manutenção

Insira seu nome completo *

Sua resposta

Severidade de falhas *

Entende-se por Severidade o risco a segurança do operador em caso de falha. Qual a importância da severidade das falhas do projeto para o desenvolvimento de um novo produto?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Mínima importância

Máxima importância

Ocorrência de falhas *

Entende-se por Ocorrência a probabilidade que uma falha aconteça. Qual a importância da ocorrência das falhas do projeto para o desenvolvimento de um novo produto?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Mínima importância

Máxima importância

Custos envolvidos *

Entende-se por Custos envolvidos o capital a ser utilizado para a correção da falha, caso ela ocorra. Qual a importância dos custos das falhas potenciais para o desenvolvimento de um novo produto?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Mínima importância

Máxima importância

Mantenabilidade do projeto *

Entende-se por Manutenibilidade o tempo que se levará para correção de falhas e o nível técnico necessário para sua correção. Qual a importância da manutenibilidade do projeto para o desenvolvimento de um novo produto?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Mínima importância

Máxima importância

APÊNDICE B – Artigo publicado no XII ConBRepro



Método de auxílio à tomada de decisão *fuzzy-TOPSIS* aplicado no FMEA de projeto para o desenvolvimento de um forno de carbonização transportável

Victor Ferreira Villarino

Coordenação de Engenharia Mecânica - UTFPR

Ricardo Vinícius Bubna Biscaia

Coordenação de Tecnologia em Manutenção Industrial - UTFPR

Henrique Ajuz Holzmann

Coordenação de Tecnologia em Manutenção Industrial - UTFPR

Aldo Braghini Junior

Departamento de Engenharia de Produção - UTFPR

Resumo: Em um mercado cada vez mais competitivo, buscar otimizar ferramentas que reduzam as falhas e custos finais durante o desenvolvimento de novos produtos é fundamental na competitividade. Neste cenário a ferramenta FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) é amplamente utilizada na análise do modo e efeito de falha, mas apresenta limitações quanto a quantificação dos riscos através do RPN (*Risk Priority Number*). Desta forma, este trabalho buscou uma adaptação do cálculo do RPN no FMEA, baseado em métodos de auxílio a tomada de decisões por multicritérios, sendo aplicado o *Direct Rating* para um ponderamento de pesos dos critérios e o método *Fuzzy-TOPSIS* para tomada de decisão. O método foi aplicado ao projeto de fornos de carbonização transportáveis de Biscaia (2021), buscando uma avaliação da viabilidade do método desenvolvido. Pode-se verificar que o método auxiliou na distribuição das incertezas existentes e melhoria na ordenação dos riscos, se comparado ao método de cálculo do RPN tradicional. A adição de novos critérios de falha expandiu a avaliação em critérios relacionados a custos e a manutenibilidade, antes desconsiderados ou intrínsecos aos critérios tradicionais. O método proposto eliminou empates entre valores de RPN, trazendo uma análise mais precisa dos modos de falha críticos e que exigem ações mais urgentes e relevantes na etapa de desenvolvimento de novos produtos.

Palavras-chave: RPN; *Fuzzy-TOPSIS*; FMEA; *Direct Rating*; Desenvolvimento de Novos Produtos.

Fuzzy-TOPSIS decision-making aid method applied in the project FMEA for the development of a transportable carbonization kiln

Abstract: In an increasingly efficient market, optimizing the tools that reduce the search and the final costs of the product or process is an essential point for competitiveness. In this scenario, the FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) tool is widely used in the analysis of the failure mode and effect, but it presents all the risks through the quantification of the RPN (*Risk Priority Number*). In this way, this work sought an adaptation of the RPN evaluation criterion in the FMEA, based on